



VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra slévárenství



**Vliv opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu a
mechanické vlastnosti odlitku**

Repeated Use of Aluminium Alloys and its Influence on Structure
and Mechanical Characteristics

Student: Bc. Pavel Vojáček

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Lichý, Ph.D

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra slévárenství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Vojáček**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T033 Slévárenské technologie
Téma: Vliv opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu a mechanické vlastnosti odlitku
Repeated Use of Aluminium Alloys and its Influence on Structure and Mechanical Characteristics

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl práce.
2. Strukturní a mechanické vlastnosti slitin hliníku.
3. Experimentální část.
4. Realizace vlastního postupu měření u vybraných slitin.
5. Rozbor a zhodnocení naměřených výsledků.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BOLIBRUCHOVÁ, D.; TILLOVÁ, E.: *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. ŽU v Žilíně, 2005, ISBN 80-8070-485-6.
- [2] BÄCKERUD, L.; CHAI, G.; TAMINEN, J.: *Solidification Characteristic of Aluminium Alloys. Foundry Alloys*. Volume 2. ASF Skanuminium, Stockholm, 1990.
- [3] BOLIBRUCHOVÁ, D.; BRŮNA, M.; SLÁDEK, A.: Vplyv pretavovania na vlastnosti zliatiny AlSi7Mg0,3 modifikovanej stronciom. *Transactions of the Universities of Košice*. 4/2009, s. 9-16, ISSN 1335- 2334.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Lichý, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Michal Cagała

Datum zadání: 15.09.2010

Datum odevzdání: 29.04.2011




prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty



Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah DP |
| 2. Zásady pro vypracování DP | 6. Textová část DP |
| 3. Prohlášení + místopřisežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřisežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. *V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.*

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

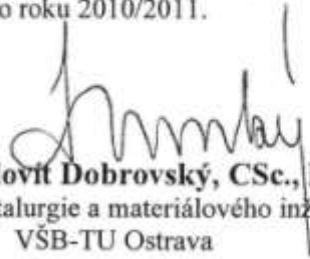
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2010/2011.

Ostrava 30. 11. 2010


Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
 děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
 VŠB-TU Ostrava

ZASADY.DOC



PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu a mechanické vlastnosti odlitku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Ostravě:.....

.....

podpis studenta



Prohlašuji, že

- ✓ byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- ✓ beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- ✓ souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- ✓ bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- ✓ bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- ✓ beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Pavel Vojáček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sehradice 181, 76323

V Ostravě:

.....



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Lichému Ph.D, za vhodné a užitečné návrhy i připomínky, které mi v průběhu zpracování mé práce poskytoval.

Také bych chtěl tímto poděkovat panu doc. Ing. Rudolfu Kořenému, CSc. za jeho rady a pomoc při vykonávání této diplomové práci.

Významné poděkování patří i celé mé rodině za podporu a trpělivost během celého mého studia.

Tato diplomová práce vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu VŠB-TU Ostrava SP 2011/40 „Studium tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských materiálů“.



ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu a mechanické vlastnosti odlitku. V teoretické části jsou shrnuty vlastnosti hliníku a jeho slitin. Dále jsou zde komentována specifika slitiny RR350 (AlCu5NiCoSbZr). U jmenované slitiny je uveden stručný souhrn vybraných binárních a ternárních diagramů. Závěrem teoretické části jsou objasněny mechanické vlastnosti, z kterých se následně vychází v experimentální části. Experimentální část se zabývá metalografickým vyhodnocením slitiny a analýzou vzorků elektronovým mikroskopem. Na závěr jsou rozebrány výsledky naměřených hodnot jak ze zkoušky v tahu, tak ze zkoušky tvrdosti dle Brinella.

Klíčová slova:

Slitiny hliníku, binární diagramy, ternární diagramy, RR350 (AlCu5NiCoSbZr), mechanické vlastnosti, zkouška v tahu, zkouška dle Brinella, metalografie, analýza vzorků, struktura kovu.

ABSTRACT

This diploma thesis is about effect of repeated use of aluminum alloys and its influence on the structure and mechanical characteristics. In the first theoretical part there are summarized the characteristics of aluminum and its alloys. There are also described the specifics of the alloy RR350 (AlCu5NiCoSbZr), followed by a summary of binary and ternary diagrams. In the end of the theoretical part mechanical characteristics are described. The experimental part is about metallographic analysis of alloy samples by electron microscopy. Finally, the both results are analyzed readings the tensile test and hardness test - Brinell.

Keywords:

aluminum alloy, binary diagrams, ternary diagrams, RR350 (AlCu5NiCoSbZr), mechanical characteristics, tensile test, hardness test – Brinell, metallographic, samples analysis, metal structure



Seznam použitého značení

Značka	Název veličiny	Jednotka
A	Tažnost	%
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
F	Síla působící na těleso	N
HB	Tvrdost dle Brinella	-
L	Aktuální délka v určitém okamžiku zatěžování	mm
L_0	Počáteční měřená délka	mm
L_{max}	Maximální délka po přetržení	mm
R	Napětí	MPa
R_e	Mez kluzu v tahu	MPa
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
S_0	Plocha počátečního průřezu	mm^2
S_{min}	Nejmenší plocha průřezu po přetržení	mm^2
Z	Kontrakce	%
ε	Poměrná délková deformace	%
ε_e	Elastická deformace	-
ε_p	Plastická deformace	-

Zkratky	Celý název
RR350	Žáropevná slitina hliníku
GOST	Al slitina s obsahem manganu



OBSAH

1.	ÚVOD.....	12
2.	TEORETICKÁ ČÁST	14
2.1.	VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN	14
2.2.	SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU	15
2.3.	VYSOKOPEVNOSTNÍ A ŽÁROPEVNÉ SLITINY HLINÍKU	20
2.3.1.	Slitina RR350 (AlCu5NiCoSbZr)	20
2.4.	BINÁRNÍ DIAGRAMY	21
2.4.1.	Binární diagram Al-Cu	21
2.4.2.	Binární diagram Al-Ni	24
2.4.3.	Binární diagram Al-Co	25
2.4.4.	Binární diagram Al-Sb	26
2.4.5.	Binární diagram Al-Zr	27
2.4.6.	Binární diagram Al-Ti	28
2.4.7.	Binární diagram Al-Mn	29
2.4.8.	Binární diagram Al-Fe	30
2.5.	TERNÁRNÍ SYSTÉMY	31
2.5.1.	Ternární systém Al-Cu-Mn	31
2.5.2.	Ternární systém Al-Cu-Ni	31
2.5.3.	Ternární systém Al-Cu-Co	31
2.5.4.	Ternární systém Al-Cu-Sb	31
2.5.5.	Ternární systém Al-Cu-Ti	31
2.5.6.	Ternární systém Al-Cu-Zr	32
2.5.7.	Ternární systém Al-Cu-Fe	32
2.6.	MECHANICKÉ VLASTNOSTI	33
2.6.1.	Přehled destruktivních zkoušek mechanických vlastností:	34
2.6.2.	Zkouška tahem	34
2.6.3.	Zkouška tvrdosti dle Brinella	38
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
3.1.	POPIS POUŽITÉ SLITINY NA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
3.2.	PŘÍPRAVA VZORKŮ	40
3.3.	METALOGRAFICKÝ VÝBRUS VZORKŮ	41



3.4.	ZHODNOCENÍ STRUKTURY POMOCÍ METALOGRAFICKÝCH VÝBRUSŮ SLITINY RR.350.....	43
3.4.1.	I. TAVBA	43
3.4.1.1.	Vyhodnocení vzorku č. 14.....	44
3.4.1.2.	Vyhodnocení vzorku č. 28.....	46
3.4.1.3.	Vyhodnocení vzorku č. 31.....	48
3.4.2.	II. TAVBA	49
3.4.2.1.	Vyhodnocení vzorku č. 40.....	50
3.4.2.2.	Vyhodnocení vzorku č. 42.....	52
3.4.2.3.	Vyhodnocení vzorku č. 52.....	54
3.4.3.	III TAVBA	55
3.4.3.1.	Vyhodnocení vzorku č. 82.....	56
3.4.3.2.	Vyhodnocení vzorku č. 84.....	58
3.4.3.3.	Vyhodnocení vzorku č. 90.....	60
3.4.4.	IV. TAVBA	61
3.4.4.1.	Vyhodnocení vzorku č. 101.....	62
3.4.4.2.	Vyhodnocení vzorku č. 104.....	64
3.4.4.3.	Vyhodnocení vzorku č. 112.....	66
3.5.	ANALÝZA VZORKŮ ELEKTRONOVÝM MIKROSKOPEM	67
3.5.1.	Vyhodnocení analýzy	68
3.5.1.1.	I. TAVBA	68
3.5.1.2.	II. TAVBA	70
3.5.1.3.	III. TAVBA	72
3.5.1.4.	IV. TAVBA	74
3.6.	POPIS STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	76
3.6.1.	Tahová zkouška.....	76
3.6.2.	Rozbor a zhodnocení naměřených výsledků	77
3.6.2.1.	I. Tavba	77
3.6.2.2.	II Tavba	79
3.6.2.3.	III Tavba	81
3.6.2.4.	IV Tavba	83
3.6.3.	Zkouška tvrdosti dle Brinella.....	86
3.6.3.1.	Rozbor a zhodnocení naměřených výsledků	87
4.	ZÁVĚR	88
5.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	93
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM GRAFŮ	95
	SEZNAM PŘÍLOH	97



1. ÚVOD

Hliník a jeho slitiny jsou v poslední době považovány za nejpoužívanější a za nejvíce se rozšiřující prvek, řazený do oblasti neželezných kovů. Setkáváme se s ním takřka v každodenním životě a v některých odvětvích je naprosto nepostradatelný. Použití slitin hliníku má velké zastoupení v automobilovém průmyslu, díky své nízké hmotnosti a mechanickým vlastnostem. Další oblastí je letecký průmysl, kde je kladen důraz na hmotnost a mechanické vlastnosti, zejména pod bodem mrazu, kde je hliník materiálem číslo jedna. Důvodem jeho rozsáhlého využití jsou příznivé vlastnosti a výjimečnost oproti ostatním neželezným kovům, jako jsou např. měď, nikl a titan. Nicméně větší použití, nežli čistý hliník, mají slitiny hliníku. Hlavním důvodem jsou radikálně se zvyšující mechanické vlastnosti.[1][2]

Dnes v podstatě můžeme říci, že hlavní hybnou silou pro vzrůst produkce hliníku v příštích letech bude automobilový a letecký průmysl. V těchto oblastech je kromě bezpečnosti základním požadavkem snížení spotřeby paliva, čehož se dá docílit především snížením hmotnosti konstrukce, přičemž hliníkové slitiny jsou v popředí zájmu výrobců. Menší spotřebou paliva dochází k snižování množství emisí, a tím se zlepšuje životní prostředí. Jinak řečeno, je tu vyvíjen tlak na aplikaci hliníku jak z důvodů ekonomických, tak i z důvodů ekologických.[2][3]

Pro přesnější představu o využití hliníku a jeho slitin v jednotlivých odvětvích průmyslu uvádím v tabulce (Tab. 1) celosvětovou spotřebu hliníku a jeho slitin v roce 2002. Z tabulky je jednoznačně patrné, že téměř 60% celosvětové produkce hliníku a jeho slitin se spotřebuje v oblasti dopravy.[1]

Tabulka 1: Celosvětová spotřeba hliníku v odvětvích průmyslu v roce 2002[1]

ODVĚTVÍ	SPOTŘEBA %
DOPRAVA	59,1
STAVEBNICTVÍ	18,4
STROJÍRENSTVÍ	10,3
ELEKTROTECHNICKÝ PRŮMYSL	7,2
POTRAVINÁŘSKÝ PRŮMYSL	4,3
OSTATNÍ	1,7



Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má opakované použití hliníkových slitin na jejich strukturu. Toho lze docílit metalografickým porovnáním struktury vzorků a následným získáním informací o struktuře materiálu. Dalším cílem bylo zjistit, jaký vliv má opakované použití hliníkových slitin na mechanické vlastnosti odlitku, pomocí zkoušky v tahu a zkoušky tvrdosti dle Brinella.

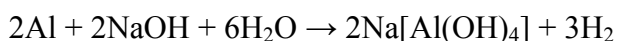
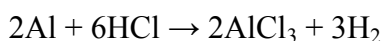


2. TEORETICKÁ ČÁST

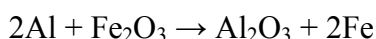
2.1. VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

Výskyt: Hliník je třetí nejrozšířenější prvek (po kyslíku a křemíku) a nejrozšířenější ze všech kovů na Zemi, ale v přírodě se vyskytuje pouze ve sloučeninách. Nejvýznamnější rudou hliníku je bauxit (AlO - jako oxid a AlOH – jako hydroxid hlinitý), ze kterého se také vyrábí. Další známou sloučeninou je kryolit ($\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$ - hexafluorohlinitan trisodný) a korund (Al_2O_3 - oxid hlinitý). [1] [5] [7]

Vlastnosti: Je to stříbrošedý a měkký kov s kubickou, plošně centrovanou mřížkou. V důsledku toho má hliník i jeho slitiny dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Vyznačuje se teplotou tavení ($660,4\text{ }^\circ\text{C}$), malou hustotou ($2698,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), výbornou tepelnou ($247\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$) a elektrickou vodivostí (62% IACS), kujností, tažností a odolností vůči korozi (na vzduchu se pokrývá tenkou a souvislou vrstvičkou Al_2O_3). Hliník je amfoterní prvek - rozpouští se v kyselinách i v alkalických hydroxidech: [1][7]



Díky své elektropozitivitě má hliník značnou afinitu ke kyslíku. Této vlastnosti využívá aluminotermie - metoda výroby některých kovů z jejich oxidů za použití hliníku jako redukčního činidla: [1]



Měrná hmotnost: Hustota hliníkových slitin se pohybuje v rozmezí $2670\text{--}2810\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je asi třetinová hodnota v porovnání s ocelmi. Praxe ukazuje, že konstrukce podobných mechanických vlastností vyrobená z hliníkové slitiny, může být až o 50 % lehčí, než stejná konstrukce vyrobená z oceli. Tohoto aspektu je využíváno zejména v dopravě (konstrukce letadel, vysokorychlostních vlaků), v mechanizaci (těla robotů), nebo vedení elektrického proudu (vodič vyrobený ze slitiny 1370 má při stejné vodivosti poloviční hmotnost než vodič z mědi). [1] [8]



Tepelná vodivost: Čistý hliník je velmi dobrým vodičem tepla, dosahuje 60 % tepelné vodivosti mědi. Hliníkové slitiny nalezneme ve výměnících kondenzačních kotlů, chladičích automobilů, klimatizacích, nebo jako pasivní chladiče ve výpočetní technice.[1][8][9]

Elektrická vodivost: Hliník dosahuje přibližně 70 % hodnoty elektrické vodivosti mědi. Díky tomu nalézá široké uplatnění v oblasti energetiky. Vodiče z hliníku a jeho slitin jsou rozšířeny po celém světě. U všech slitin platí, že jejich vodivost je nižší, než vodivost čistého hliníku.[1][8][9]

2.2. SLÉVÁRENSKÉ SLITINY HLINÍKU

Jsou to slitiny, od kterých se požadují dobré slévárenské vlastnosti (zabíhavost, sklon ke vzniku staženin, sklon k naplynění, odolnost proti vzniku trhlin a prasklin), důležité technologické vlastnosti (obrobitelnost, odolnost proti korozi, svařitelnost, lešitelnost, nepropustnost tlakového média – plynu nebo kapaliny skrze stěny odlitku) a dobré mechanické vlastnosti (mez pevnosti, tažnost, tvrdost, mechanické vlastnosti za zvýšených teplot a za nízkých teplot).

Slévárenské slitiny hliníku navíc mají celkově vyšší obsah legujících prvků, než u slitin pro tváření. Množství a vzájemná kombinace těchto prvků má vliv na chemické složení a tím na zlepšení mechanických a technologických vlastností.[5]

Největší zájem je především o pevnostní vlastnosti vzhledem k tomu, že samotný hliník má nízké pevnostní vlastnosti, což značně omezuje jeho použití ve větším měřítku (hliník vyšší čistoty má $R_m = 40-50\text{Mpa}$, $A = 70-90\%$)

Slitiny obsahují:

- základní prvek
- hlavní přísadové prvky
- vedlejší přísadové prvky
- doprovodné prvky



Základní prvek

Hlavní prvek určuje druh slitiny – u hliníkových slitin je jím hliník.

Hlavní přísadové prvky

Určují základní vlastnosti slitiny. Jejich množství bývá po základním prvku druhé nejvyšší. Hlavními přísadovými prvky ve slévárenských slitinách hliníku jsou křemík, měď a hořčík, spíše výjimečně také zinek nebo mangan. Podle nich se slitiny hliníku dělí na základní typy s obvyklými názvy: [5] [9]

- slitiny Al – Si – siluminy
- slitiny Al – Cu – duralaluminium
- slitiny Al – Mg – hydronalium

Vedlejší přísadové prvky

Jsou to takové elementy, které jsou přidávány do slitiny za účelem zlepšení jejich vlastností. Často jich bývá více a jejich obsah je nižší, než hlavních přísadových prvků, zpravidla méně než 1 %. Aditivy mohou být i všechny hlavní přísadové prvky. Častými aditivy jsou chrom a mangan (zlepšující svařitelnost), nikl (zvyšuje odolnost za vyšších teplot), titan (zjemňuje strukturu slitiny), beryllium, zirkonium, olovo (lepší zpracovatelské vlastnosti) atd. [1][5][9]

Doprovodné prvky

Jako doprovodné prvky se označují takové prvky, které nebyly do slitiny přidány úmyslně. Při překročení určité koncentrace zhoršují vlastnosti slitiny, a jsou považovány za nečistoty. Působí tak, že nepříznivě ovlivňují vlastnosti základního kovu, v němž jsou rozpuštěny, nebo tvoří samostatné fáze, které mají negativní vliv na vlastnosti slitiny.

Zdrojem doprovodných prvků jsou zejména vsázkové suroviny. Případně se do slitiny dostávají z nářadí nebo vyzdívky. Velkým zdrojem nečistot bývá přetavovaný šrot. U doprovodných prvků je velký problém s jejich odstraňováním. Často je nelze ve slévárnách vůbec odstranit a snižování jejich koncentrace je realizováno ředěním pomocí čistých surovin.[5] [9]



ZÁKLADNÍ POZNATKY O VLIVU PŮSOBÍCÍCH PRVKŮ NEBO PŘÍMĚSÍ NA VLASTNOSTI ALA JEHO SLITIN [1][10]

Bor (Borum): chemická značka B – je legován za účelem zjemnění struktury slitin hliníku

Bismut (Bismuthum): chemická značka Bi – je legován za účelem zlepšení mechanické obrobitelnosti.

Antimon (Stibium): chemická značka Sb – zvyšuje odolnost vůči korozi v mořské vodě. Snižuje náchylnost Al-Mg slitin ke vzniku trhlin za tepla. Může být pozitivně využit ke kompenzaci objemových změn

Chrom (Chromium): chemická značka Cr – je aplikován za účelem snížení náchylnosti k růstu zrn u Al-Mg slitin, ztížení procesu rekrytalizace u Al-Mg-Si a Al-Mg-Zn slitin a u vytvrditelných slitin zvyšuje kalitelnost.

Měď (Cuprum): chemická značka Cu – je legována za účelem zvýšení pevnostních vlastností. Snižuje odolnost proti korozi, čímž je nepřijatelná ve slitinách určených v potravinářském průmyslu. V technických slitinách je nejčastěji legována spolu s Mg.

Kobalt (Cobaltum): chemická značka Co – u některých Al-Si slitin s přítomností Fe je legován za účelem transformace jehlicovité β fáze bohaté na Fe na kulovitou morfologii. Tím se u těchto slitin zvyšují pevnostní i plastické vlastnosti. Kobalt také slouží ve slitinách jako prvek, zvyšující žárovečnost.

Železo (Ferrum): chemická značka Fe – je běžnou nečistotou v Al. Rozpustnost v tuhém stavu je nízká ($\sim 0,04\%$), v důsledku čehož je ve struktuře přítomen jako intermetalická sloučenina s Al. U slitin typu Al-Cu vytvořením intermetalické fáze Al_7FeCu_2 dochází k ochuzení tuhého roztoku α o měď a tím ke snížení pevnostních vlastností. Blokuje růst zrna v případě disperzně vyloučených bohatých částic na Fe ve struktuře. U slitin typu Al-Cu-Ni zvyšuje pevnostní vlastnosti za zvýšených teplot a creep

Olovo (Plumbum): chemická značka Pb – doposud je aplikován jako legující prvek s cílem zlepšit mechanickou obrobitelnost. U slitin Al-Cu-Mg může být příčinou vzniku trhlin za tepla v důsledku segregace v průběhu krystalizace.

Lithium (Lithium): chemická značka Li – je legujícím prvkem u slitin typu Al-Cu-Mg-Li. Jedná se o slitiny, kde jsou díky přítomnosti koherentních precipitátů $LiAl_3$ pevnostní vlastnosti i modul E vysoké. Jelikož se jedná o legující prvek s nízkou specifickou hmotností, jsou jím legovány “lehčí” slitiny.

Hořčík (Magnesium): chemická značka Mg – je především legujícím prvkem u slitin série 5xxx. Když dojde k vyloučení precipitátu typu Mg_5Al_3 resp. Mg_5Al_8 na hranicích zrn,



slitina se stává náchylnou k interkrystalickému porušení a interkrystalické korozi. Je také legujícím prvkem u slitin Al-Cu-Mg (série 2xxx) a Al-Mg-Si (série 6xxx), u kterých se podílí především na zvýšení pevnostních vlastností.

Mangan (Manganum): chemická značka Mn – je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností, zvýšení teploty rekrytalizace, zjemnění zrna, blokování růstu zrn v případě jeho vyloučení ve formě disperzních precipitátů, zvýšení citlivosti ke kalení a potlačení vyloučení Fe v destičkovitém tvaru a vytvoření intermetalické fáze (AlFeMn).

Molybden (Molybdaenum): chemická značka Mo – v ojedinělých případech je legován v množství do 0,3% s cílem zjemnění struktury.

Nikl (Niccolum): chemická značka Ni – jeho rozpustnost v tuhém stavu je méně než 0,04%. U slitin typu Al-Cu a Al-Si je legován za účelem zvýšení pevnostních vlastností za vyšších teplot, snížení koeficientu teplotní roztažnosti a zlepšení odolnosti vůči korozi.

Fosfor (Phosphorus): chemická značka P – u nadeutektických slitin Al-Si může být aplikován jako modifikátor.

Křemík (Silicium): chemická značka Si – hlavním legujícím prvkem pro slévárenské slitiny Al-Si (siluminy). Obsah Si se u těchto slitin pohybuje většinou mezi 5 až 13 %. Pro zvýšení mechanických vlastností pomocí tepelného zpracování se přidávají další legující prvky a to Mg a Cu.

Stříbro (Argentum): chemická značka Ag – v množství 0,1-0,6% významně zvyšuje odolnost vůči korozi za napětí slitin typu Al-Zn-Mg při současném zvýšení pevnostních vlastností.

Stroncium (Stroncium): chemická značka Sr – je aplikován u slévárenských slitin Al-Si za účelem modifikace Si.

Cín (Stannum): chemická značka Sn – je hlavní legující prvek pro ložiskové slitiny Al-Sn. Malé množství Sn (0,05%) u slitin typu Al-Cu zvyšuje jejich citlivost ke stárnutí za vyšších teplot – zvyšuje rychlost procesu a také zvyšuje pevnostní vlastnosti. Na druhé straně je nutno říci, že vyšší koncentrace než 0,05% způsobuje vznik trhlin za tepla u slitin typu Al-Cu a zhoršuje odolnost vůči korozi.

Titan (Titanium): chemická značka Ti – je legován spolu s Borem za účelem zjemnění struktury – tvorba jemných intermetalických částic TiB₂ a to již v průběhu krystalizace.

Zinek (Zincum): chemická značka Zn – je hlavní legující prvek tepelně zpracovatelných slitin série 7xxx. V součinnosti s Mg vytváří intermetalickou fázi MgZn₂.

Zirkonium (Zirkonium): chemická značka Zr – je legován u některých slitin v množství 0,1-0,3%. Vytváří jemné precipitáty, které blokují procesy zotavení a rekrytalizace. U slitin typu Al-Zn-Mg je legován s cínem za účelem získání jemné struktury u odlitků. Zirkon má tedy pozitivní vliv na zvýšení mechanických vlastností za normálních teplot.

V tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny některé základní informace o nejběžněji se vyskytujících intermetalických fázích v Al slitinách.

Tabulka 2: Nejběžnější intermetalické fáze ve slitinách Al [1]

FÁZE	MŘÍŽKA	HUSTOTA (g.cm ⁻³)	TEPLOTA TAVENÍ (°C)
CuAl ₂	T	4,34	591
FeAl ₃	M	3,78	1160
Mg ₂ Al ₃	K12	2,23	452
MnAl ₆	R	3,21	710
NiAl ₃	R	3,96	854
TiAl ₃	T	3,37	1340
Mg ₂ Si	K12	1,99	1102
MgZn ₂	H	5,2	590
Cu ₂ FeAl ₇	T	4,44	/
CuMgAl ₂	R	4,13	850
Cu ₂ Mn ₃ Al ₂	R	3,59	/
Mg ₃ Zn ₃ Al ₂	K12	3,8	530
Cu ₃ NiAl ₆	K8	5,48	820

Poznámka: T – mřížka tetragonální, M – mřížka monoklinická, R – mřížka rombická, H – mřížka hexagonální



2.3. VYSOKOPEVNOSTNÍ A ŽÁROPEVNÉ SLITINY HLINÍKU

Vysokopevnostní slitiny mají vysoké pevnostní vlastnosti za normálních teplot. Žáropevné slitiny nemusí mít nejvyšší pevnostní vlastnosti za normálních teplot, ale udržují poměrně vysoké pevnostní vlastnosti při zvýšených teplotách, případně při cyklických změnách teplot. V této diplomové práci se zabývám slitinou RR350 na bázi Al-Cu legovanou především niklem, kobaltem a dalšími prvky z čehož vyplývá, že se jedná o žárovevnou slitinu. Proto je nezbytné rozebrat a poznat vliv jednotlivých prvků a jejich vzájemné působení. V tomto případě jde o analýzu nejprve binárních slitin na bázi hliníku s jednotlivými prvky a pak vliv dalších prvků na základní binární slitinu Al-Cu. [12]

2.3.1. Slitina RR350 (AlCu5NiCoSbZr)

V anglických normách je slitina známá pod označením RR350 – HIDUMINIUM, dle německé normy též ALUFOND 60. Slitina (G – AlCu5NiCoSbZr) má předepsané chemické složení Cu 4,5-5,2 hm%; Ni 1,3-1,7 hm%; Co 0,1-0,4 hm%; Sb 0,1-0,3 hm%; Zr 0,1-0,3 hm%; Ti 0,15-0,30 hm%; Mn 0,1-0,3 hm%. Je doporučována pouze k výrobě odlitků do netrvalých pískových forem a to pro případy strojních součástí, pracujících za zvýšených teplot, zvláště pro případy cyklických změn teplot v průběhu provozního využívání. Další zápornou vlastností této slitiny je vytváření rozptýlené pórovitosti a dutin všech druhů. [12]

Tabulka 3: Vlastnosti slitiny RR350

Měrná hmotnost slitin	2.84 kg / dm ³
Interval tuhnutí	645 – 540 °C
Smrštění	1 – 1,5 %
Tepelná vodivost	118 W / (m.K)
Modul pružnosti	74,5 MPa

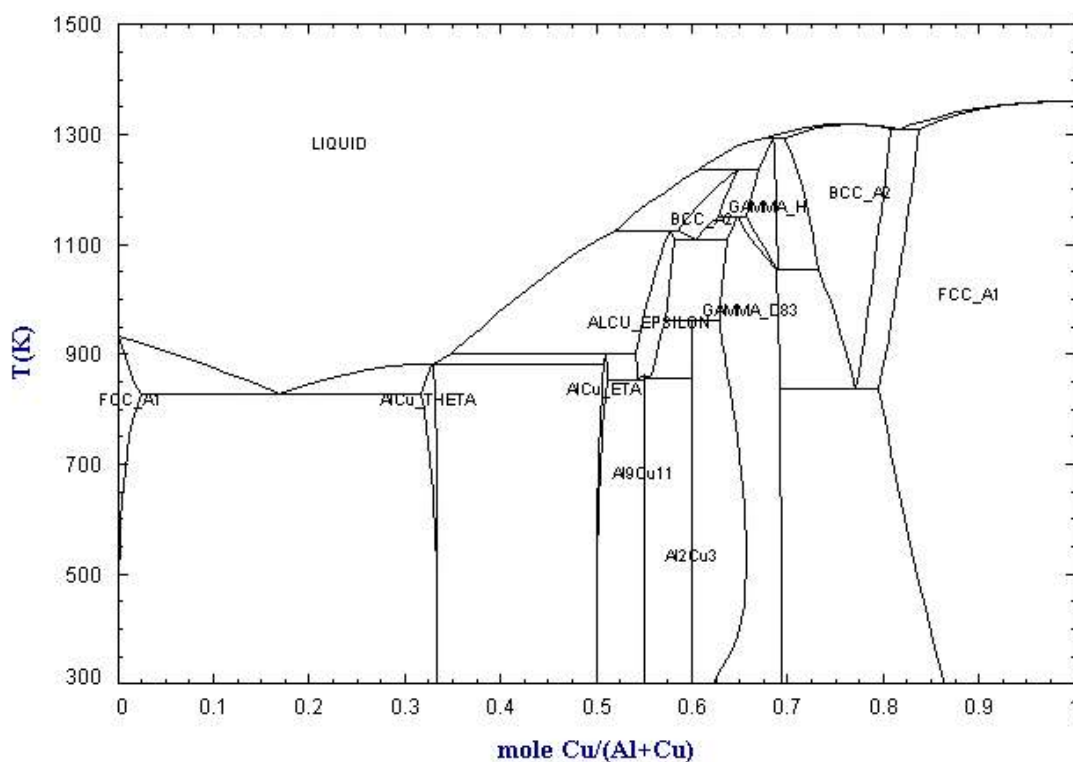
2.4. BINÁRNÍ DIAGRAMY

2.4.1. Binární diagram Al-Cu

Nejvýznamnější skupinou vysokopevnostních a žárovevných slitin hliníku jsou slitiny hliník-měď. Vynikají proti slitinám Al-Si vyššími pevnostmi i za zvýšených teplot a to až do 350°C.

Měď je považována za jeden z nejdůležitějších prvků v hliníkových slitinách díky značné rozpustnosti v hliníku a zpevňujícímu účinku. Je legována za účelem zvýšení pevnostních vlastností. Ta fáze, která způsobuje významné zvýšení meze pevnosti, tvrdosti a pokles plastických vlastností po tepelném zpracování, má označení Al_2Cu a je nekoherentním precipitátem vzniku zárodků. Bod tání této fáze je 591°C. Při legování dalšími prvky mohou vzniknout intermetalické fáze s vhodnými vlastnostmi.

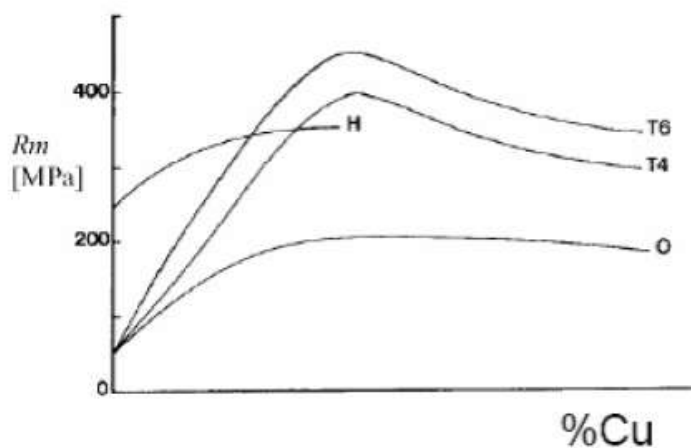
S diagramu (Obr. 1) je patrné, že se jedná o eutektický typ diagramu s omezenou rozpustností 5,65% při 548°C.[1][8][12]



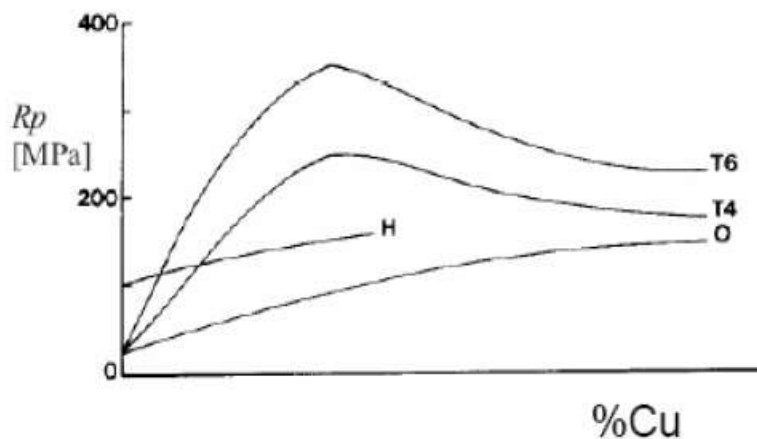
Obrázek 1: Binární diagram Al-Cu [13]

Na diagramech (Obr. 2, 3, 4) vidíme změny meze pevnosti (R_m), meze kluzu (R_p) a prodloužení (A) hliníku v závislosti na koncentraci Cu.[1][7]

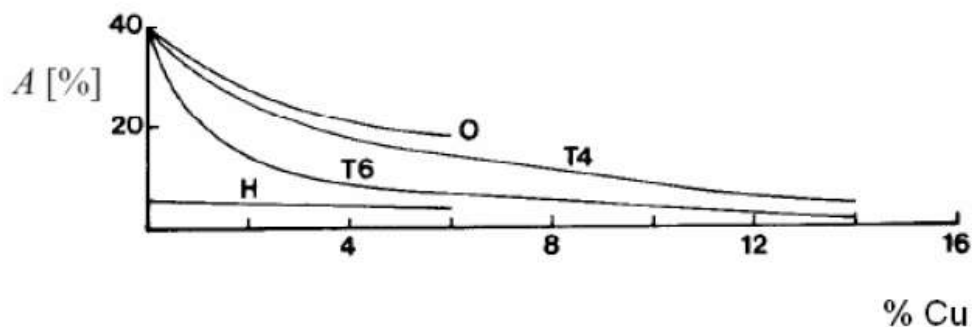
(H- mechanicky zpevněné, O-stav žíhaný, T4-zakalení a přirozené stárnutí, T6-zakalení a umělé stárnutí)



Obrázek 2: Závislosti meze pevnosti (R_m) na obsahu mědi[1]



Obrázek 3: Závislosti smluvní meze kluzu (R_p) na obsahu mědi[1]



Obrázek 4: Závislosti tažnosti (A) na obsahu mědi[1]

Mechanické vlastnosti slitin Al-Cu závisí na tom, jestli se Cu nachází v tuhém roztoku ve formě sféroidické, případně jako rozptýlené částice, nebo zda vytváří síť na hranicích zrn. [1]

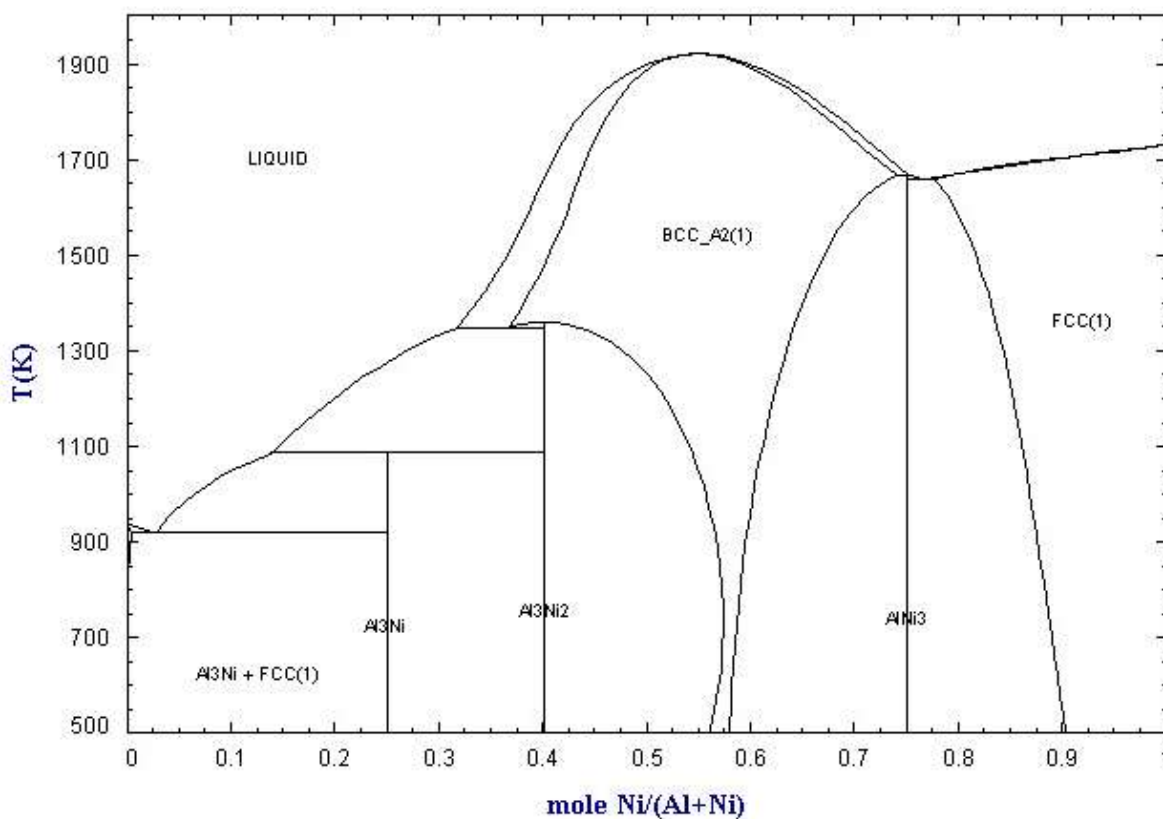
I když je skupina slitin hliník-měď základem vysokopevnostních a žárovevných slitin se žádoucími vlastnostmi, je třeba počítat současně s určitými negativními parametry. Slitiny mají horší zabíhavost, široký interval tuhnutí, sklon k dendritickému odměšování, rozptýlené pórovitosti, značný sklon ke vzniku trhlin již při odlévání a sníženou korozivzdornost. Proto je nutno binární slitinu hliník-měď legovat dalšími prvky s cílem zvýšení meze kluzu, meze únavy, zvýšení součinitele zpevnění za mezí úměrnosti a snížení relaxační schopnosti materiálu za tepla.[5][12]

2.4.2. Binární diagram Al-Ni

Jde zde o eutektický typ binárního diagramu s teplotou eutektika 640°C (Obr. 5), nikl ve slitině slouží ke zvýšení žáropevnosti a žáruvzdornosti. Fázový diagram systému Al-Ni se skládá ze dvou KPC tuhých roztoků (Al) a (Ni) a několika intermetalických fází AlNi_3 , AlNi , Al_3Ni_2 , Al_3Ni a Al_3Ni_5 . Vzniklá fáze Al_3Ni , eutektikum Al – Al_3Ni se uplatňuje jako kompozitní materiál k užití za zvýšených teplot. Rozpustnost Ni v tuhém roztoku (Al) je velmi omezená a s poklesem teploty dochází ke snížení rozpustnosti z 0,11% Ni při eutektické teplotě na 0,01% Ni při 500°C. V tuhém roztoku (Ni) se rozpouští hliník až do maxima 21,2% Al při eutektické teplotě 1385°C[10][14]

Nikl, zároveň jako mangan, ovlivňuje rychlost difuze mědi v hliníku. Taktéž působí na zjemnění zrna u slitiny na bázi hliník-měď v litém stavu, kde se tento efekt udržuje i po deformaci a tepelném zpracování. [12]

Důležitý smysl legování niklem je ten, že vytvořená intermetalické fáze typu Al_9FeNi , je účinnou překážkou smykového pohybu kluzných rovin.[1]

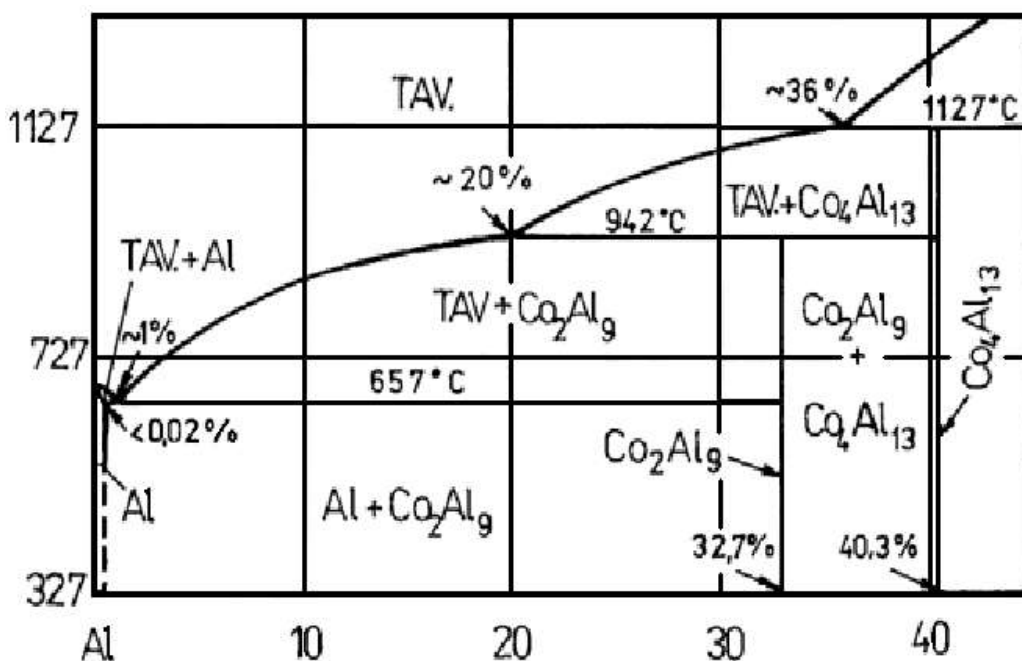


Obrázek 5: Binární diagram Al-Ni [15]

2.4.3. Binární diagram Al-Co

Binární Systém hliník-kobalt tvoří eutektický tip diagramu (Obr. 6), kde eutektikum má koncentraci kobaltu asi 1,9 hm.%, při teplotě 657°C a maximální hodnoty rozpustnosti kobaltu v hliníku činí méně než 0,02 hm.%. U koncentrace vyšší než 1,0% Co se primárně v předslitině vylučuje fáze Al_9Co_2 , která může být i součástí eutektika. Fáze Al_9Co_2 , která je velmi tvrdá, křehká a nemění své vlastnosti až do teploty 420°C, je výhodná z hlediska k udržení vysoké žárovevnosti.

Z toho vyplývá, že kobalt slouží ve slitinách jako prvek, zvyšující žárovevnost, většinou ve slitinách železa a niklu. Difuze kobaltu v hliníku je velmi malá ($D_0 = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), takže dochází k celkovému zpomalení difuzních pochodů.[12]

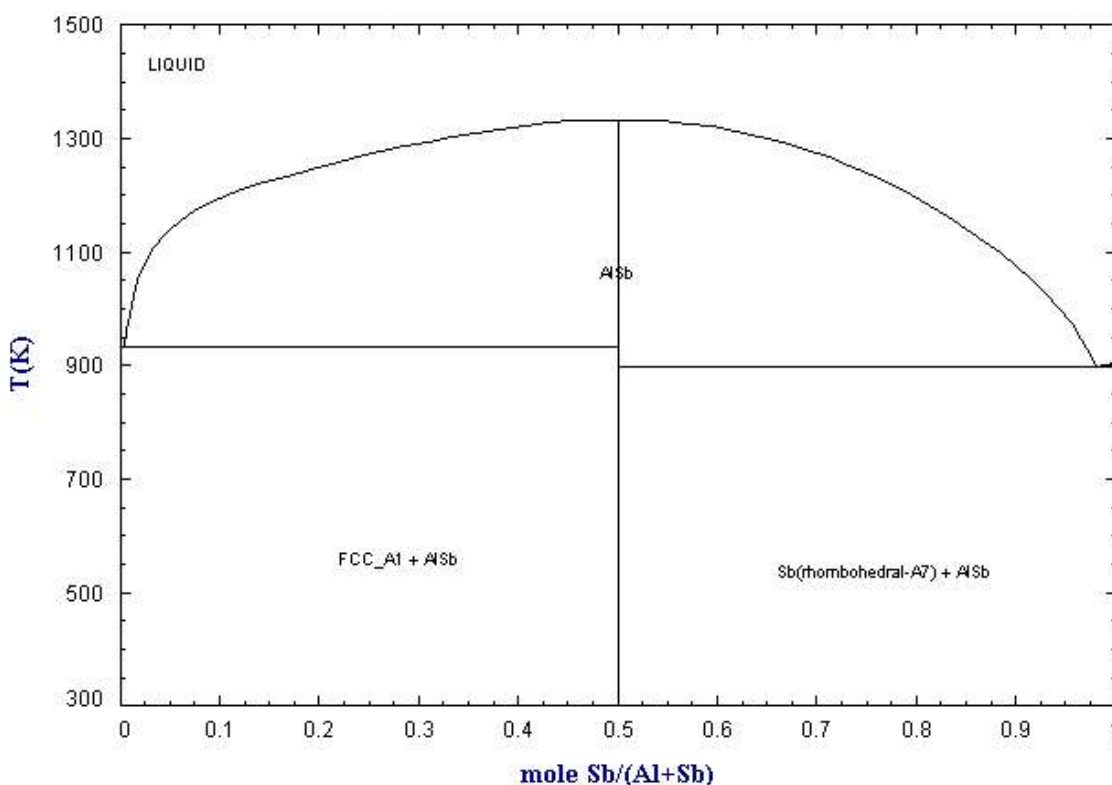


Obrázek 6: Binární diagram Al-Co [12]

2.4.4. Binární diagram Al-Sb

Antimon se používá jako modifikační prvek ve slitinách hliník – křemík. Rozpustnost antimonu v hliníku je v celém teplotním intervalu minimální a téměř konstantní. V binárním systému hliník-antimon se tvoří eutektikum s koncentrací asi 1,0 hm.% při teplotě 658°C a vzniká fáze AlSb (bod tání 804°C), která jako chemická sloučenina, rozděluje celý systém na dvě samostatné části (Obr.7).

Antimon má v tuhém skupenství krystalografickou mřížku s těsným uspořádáním, při ohřevu zmenšuje objem a při tuhnutí naopak objem zvětšuje. Právě tento jev (zvětšování objemu při tuhnutí) může být pozitivně využit ke kompenzaci objemových změn, snížení smršťovacího napětí a tím snížení sklonu ke vzniku trhlin.[1][12]



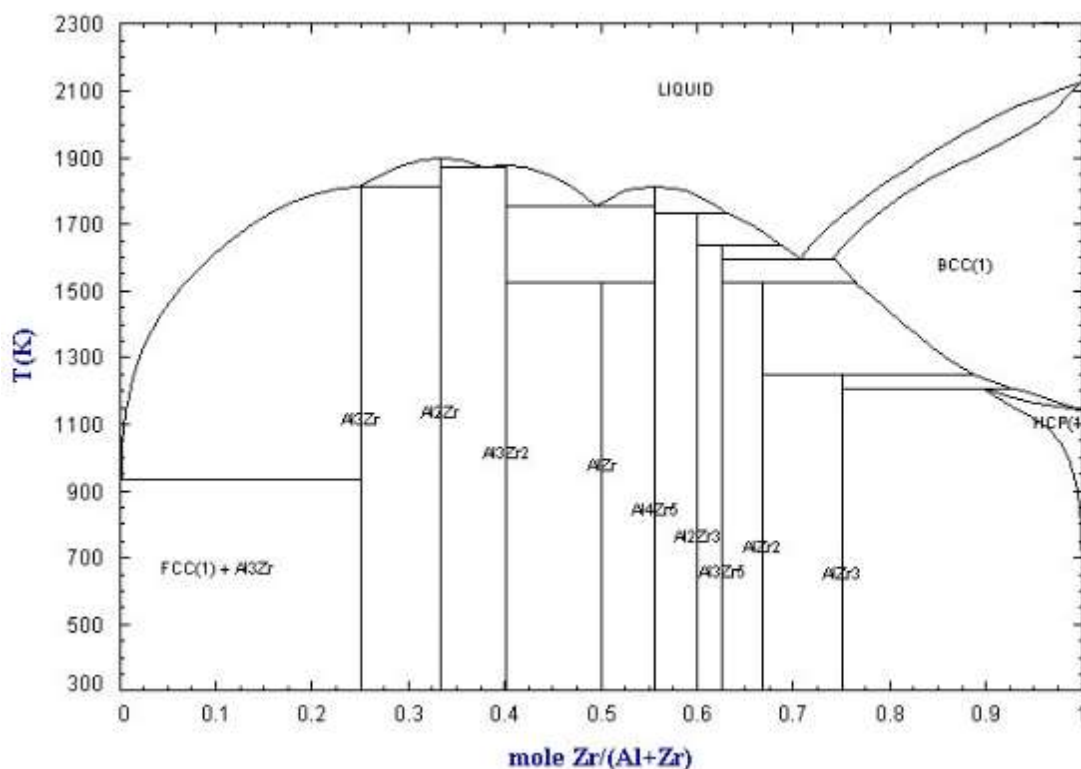
Obrázek 7: Binární diagram Al-Sb [13]

2.4.5. Binární diagram Al-Zr

Působení zirkonu je zcela podobné jako u titanu. Vlivem zirkonu na slitinu Al19 (žáropevná slitina Al-Cu) bylo prokázáno, že legováním 0,05 – 0,2% Zr do slitiny, se zvyšuje žáropevnost a tzv. dlouhodobá pevnost. Zirkon má pozitivní vliv na zvýšení mechanických vlastností za normálních teplot.[12]

Tímto legováním se dospělo k velmi významnému technickému postupu. Z technického hlediska je nutno počítat s množstvím oxidace zirkonu, tedy jeho nevratnými ztrátami, dále též s obtížným stanovením jeho obsahu jak v předslitině, tak v konečných produktech.[12]

Je rovněž nutno zdůraznit, že rozpustnost vodíku v titanu i zirkonu, je exotermický pochod, čili rozpustnost vodíku s rostoucí teplotou klesá.

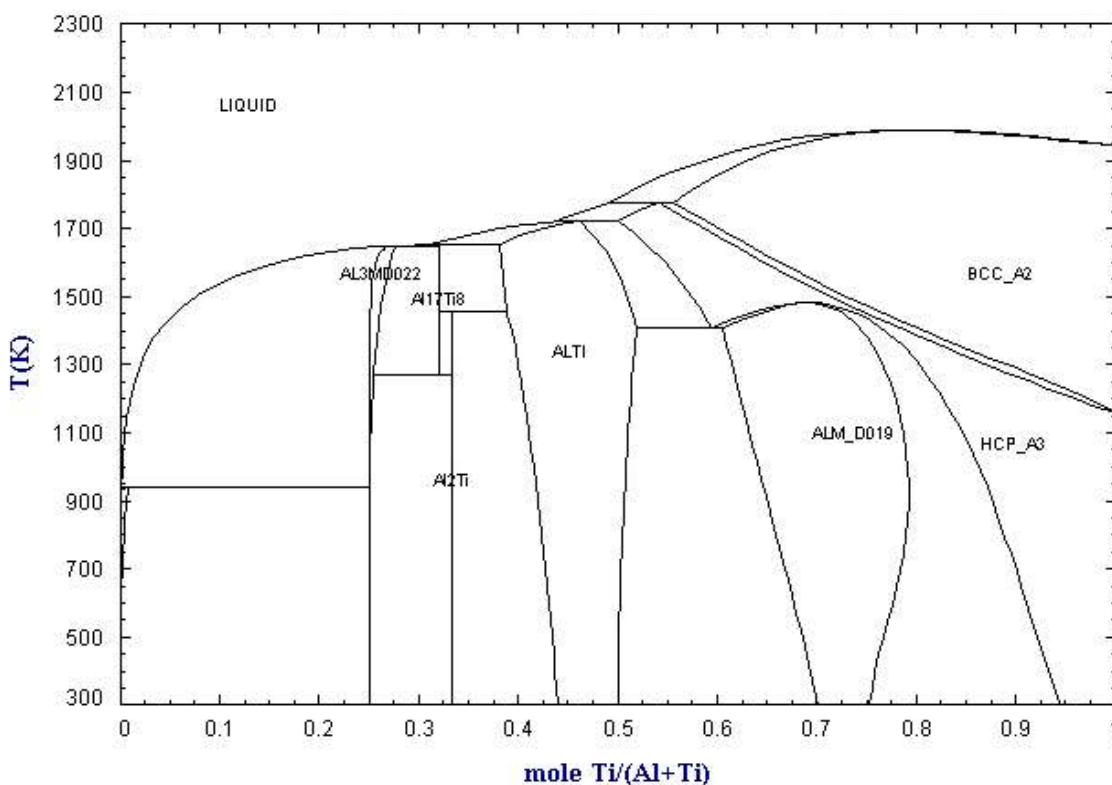


Obrázek 8: Binární diagram Al-Zr [16]

2.4.6. Binární diagram Al-Ti

V tomto binárním systému (Obr. 9) se tvoří peritektická reakce při teplotě 665°C a obsahu titanu v tavenině 0,12 - 0,15 hm.% a tuhého roztoku titanu 1,2 – 1,4 hm.%. Fáze Al_3Ti má oblast v rozsahu od 26,5 do 37,5hm.%, která má tetragonální krystalografickou mřížku a bod tání 1337°C. [1]

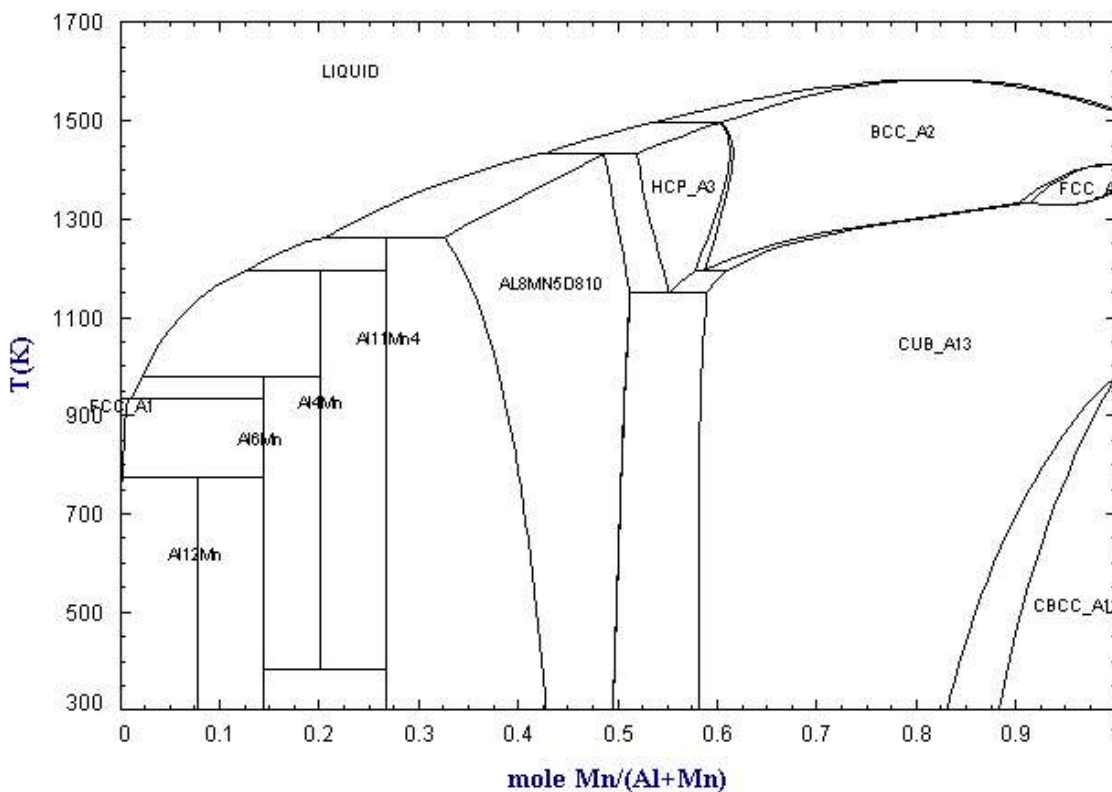
Legování titanem u čistého hliníku a jeho slitin výrazně mění makrostrukturu v litém stavu. Titan efektivně působí na zvýšení rovnoměrnosti průběhů procesu plastické deformace tuhého roztoku. Použití očkovacích solí nebo předslitin hliník – titan – bor lze doporučit k zmenšení velikosti zrna u všech slitin hliníku. Svým očkovacím účinkem pozitivně působí na tažnost slitin a zároveň snižuje sklon ke vzniku trhlin. Titan do obsahu 0,45hm.% výrazně zvyšuje mez pevnosti v tahu.[12]



Obrázek 9: Binární diagram Al-Ti [13]

2.4.7. Binární diagram Al-Mn

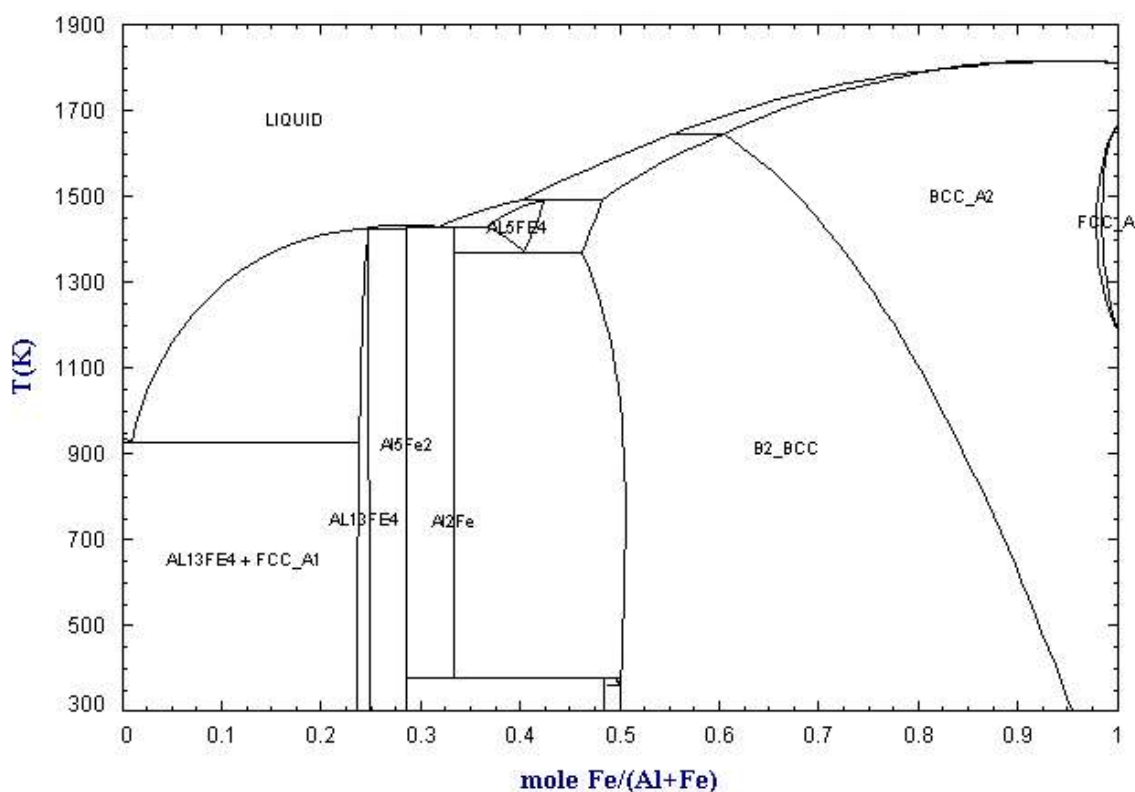
U binárního diagramu hliník-mangan (Obr. 10) vidíme, že vzniká eutektikum. Při koncentraci do 4,1hm.% manganu se primárně vylučuje tuhý roztok alfa (do 1,9hm.%) od 1,9 do 4,1hm.% Al_6Mn (křehká fáze) a od 4,1 až do 13 hm.% se začíná vylučovat fáze Al_4Mn . Při teplotě nad 710°C se tato fáze rozpadá peritektickou reakcí na taveninu a Al_6Mn . U zvyšující se koncentrace manganu se mohou v binární slitině vyskytovat ještě primárně vyloučené fáze jako Al_4Mn , Al_3Mn a jiné. Mangan jako legující prvek je používán téměř do všech slitin hliníku, neboť eliminuje vliv železa. Dále mangan působí velice kladně na zvýšení meziatomárních sil, čímž se snižuje součinitel samodifuze hliníku. Velmi dobře se tohoto jevu využívá u slitiny GOST s obsahem manganu 0,6 – 1 hm.%, kdy se po tepelném zpracování objevuje ve struktuře tuhý roztok alfa a fáze T ($\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$) a Al_3Ti . Mangan nám nejefektivněji zpomaluje rozpad tuhého roztoku a difuzi mědi. Zmenšuje možnost koagulace částic fáze Al_2Cu a tím pozitivně ovlivňuje žárovečnou slitinu hliníku.[1][11][12]



Obrázek 10: Binární diagram Al-Mn [13]

2.4.8. Binární diagram Al-Fe

Ve slitinách hliníku je železo nežádoucím prvkem, dostává se tam však již při prvovýrobě. Obsah železa by neměl překročit 0,15 hm.%, ale většinou se pohybuje v koncentraci až do 0,3 hm.%. Tvoří eutektikum a při teplotě 655°C se dostane až na koncentraci 1,8 hm.% a maximální rozpustnost se pak pohybuje kolem 0,04 hm.%. Díky železu se zhoršují vlastnosti slitiny a klesá její plasticita. Železo ve slitinách vytváří fázi na bázi AlFeMn (typ „Čínské písmo“), která se na metalografickém výbrusu projevuje jako jehlicovitě, deskovitě či kostěné útvary, vytvářející jakousi výztuž slitiny. Po přidání niklu vznikne intermetalická fáze Al_9NiFe , která zabraňuje šíření trhlin v materiálu při cyklickém namáhání. Z toho vyplývá, že ne vždy je železo nežádoucí. [1][12]



Obrázek 11: Binární diagram Al-Fe [17]



2.5. TERNÁRNÍ SYSTÉMY

Je třeba posoudit i možnosti vzniku vícesložkových intermetalických fází s oběma prvky a to hliníkem i mědí.

2.5.1. Ternární systém Al-Cu-Mn

Právě tento ternární systém lze považovat za základ žárovevných slitin hliníku, protože mangan zvyšuje pevnost v tahu při zvýšených teplotách. Po tepelném zpracování se vytváří fáze ($\text{Al}_{12}\text{Mn}_2\text{Cu}$). Z taveniny se první začne vylučovat fáze Al_6Mn . S přítomností mědi a železa se fáze mění na $\text{Al}_6(\text{MnFeCu})$, která se peritektickou reakcí mění na fázi $\text{Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}_2$. Zbývajících tavenina může obsahovat fázi Mg_2Si a dále fázi Al_2CuMg , ovšem za předpokladu, že slitina obsahuje hořčík a křemík, což však není případ slitiny RR350.[12]

2.5.2. Ternární systém Al-Cu-Ni

Nikl může vytvářet s mědí fázi T (Al_2CuNi) ale také ($\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$), které se připisuje výrazné zvýšení žárovevnosti slitin. Kombinace těchto prvků vede ke slitinám sice dostatečně žárovevným, ale s řadou nepříznivých vlastností – vysoký součinitel délkové roztažnosti, sklonem k tvorbě trhlin, sklonem ke vzniku mikropórovitosti a výskytu plynových bublin. Je nutno zdůraznit vysokou rovnovážnou rozpustnost vodíku v niklu, která se při legování niklem přenáší i na slitinu.[12]

2.5.3. Ternární systém Al-Cu-Co

Kobalt i v tomto případě má již dříve uvedené vlastnosti. S mědí netvoří samostatnou intermetalickou fázi. Ve většině případů vysokopevnostních a žárovevných slitin hliníku se neobjevuje.[12]

2.5.4. Ternární systém Al-Cu-Sb

Popsaný vztah hliníku a antimonu byl již uveden v systému Al-Sb. Uvedený ternární systém lze doplnit faktem, že antimon je v mědi rozpustný, což dokazuje binární diagram měď – antimon.[12]

2.5.5. Ternární systém Al-Cu-Ti

Titan výrazně mění makrostrukturu samotného hliníku a jeho slitin a to se všemi pozitivními důsledky. Lze konstatovat, že obsah titanu ve slitinách hliníku by měl dosahovat 0,15 – 0,30 hm%. Titan se také používá ve slitinách mědi k zjemnění makrostruktury v kombinaci s vanadem nebo bórem. V našich slévárnách se titan většinou



objevuje v předslitině firmy Kawecki-Billition o složení AlTi5B1. Titan má kromě již popsaných vlivů další schopnosti a to vytvářet intermetalické fáze s dalšími legujícími prvky.[12]

2.5.6. Ternární systém Al-Cu-Zr

Na žáropevnost má podstatně výraznější vliv. Fáze $ZrAl_3$ je velmi vhodnou strukturní složkou, vhodnější než $TiAl_3$. Při obsahu Zr větší než 0,1 hm% se nezávisle na obsahu dalších prvků vytváří disperzní kulovité částice o průměru 10-15 nm. [12]

2.5.7. Ternární systém Al-Cu-Fe

Jak již bylo uvedeno u binárních systémů, železo tvoří jehlicovité, deskovité apod. útvary, které negativně ovlivňují plasticitu slitiny za normálních teplot. Tyto nepříznivé vlivy železa však můžeme eliminovat přidáním niklu, vzniká pak fáze Al_9FeNi . Přítomnost železa může také vytvářet fázi $AlCuMnFe$ (nerozpustnou), která k sobě váže prvky Cu a Mn. Jak již bylo uvedeno, neměl by obsah železa překročit koncentraci 0,15 hm.%, tuto koncentraci však nelze dodržet u kokilového lití.[12]

2.6. MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanická vlastnost je odezva daného materiálu na vnější silové zatížení, charakterizovaná fyzikální veličinou, nejčastěji napětím a deformací. Při jejím určování se sice uplatňují zjednodušující předpoklady, ale tak, aby byla výsledná data použitelná a věrohodná. [19]

Za základní mechanické vlastnosti považujeme pružnost, tvárnost, pevnost a houževnatost. Jejich definice jsou následující:[20]

*„**Pružnost (elasticita)** je schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná, při odlehčení se rozměry tělesa vrátí na původní hodnoty. Při pružné deformaci neplatí zákon zachování objemu.“*

*„**Plasticita (tvárnost)** je schopnost materiálu deformovat se před porušením plasticky. Plastická deformace je deformace nevratná, při odlehčení se rozměry tělesa nevrátí na původní hodnoty. Při plastické deformaci platí zákon zachování objemu.“*

*„**Pevnost** je odolnost materiálu proti trvalému porušení soudružnosti částic.“*

*„**Houževnatost** je odolnost materiálu vůči vzniku deformace nebo porušení. Mírou houževnatosti je množství mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo k porušení materiálu.“*

Pevnostní vlastnosti tedy patří díky velkému praktickému významu k vlastnostem, které jsou nejčastějším kritériem, podle kterého se rozhoduje o vhodnosti určitého materiálu a jeho předpokládaného použití. Pomocí zkoušek mechanických vlastností jsou určovány základní mechanické charakteristiky používané k hodnocení jakosti materiálu, pro výpočty konstrukcí i k obecnému posouzení vhodnosti určitých technologických operací.[18]

V některých případech vystačíme se základními mechanickými vlastnostmi určenými zkouškou tahem, v některých se neobejdeme bez znalosti celého spektra charakteristik. Typickým příkladem je automobilový průmysl, kde zvyšující se podíl hliníkových slitin v konstrukci automobilu a zvyšující se nároky na tyto konstrukce vedou k tomu, že u těchto materiálů je nutné pracovat s charakteristikami, které dříve vyžadoval jen letecký průmysl.

2.6.1. Přehled destruktivních zkoušek mechanických vlastností:

Tabulka 4: Destruktivní zkoušky mechanických vlastností [20]

zatížení	krátkodobé	dlouhodobé
statické	zkouška tahem	zkouška tečení
	zkouška tlakem	
	zkouška ohybem	
	zkouška krutem	
	zkouška střihem	
	zkoušky tvrdosti	
dynamické	zkoušky tvrdosti	zkoušky vysokocyklové únavy
	zkouška rázem v ohybu	
	zkoušky nízkocyklové únavy	

2.6.2. Zkouška tahem

Nejčastěji používanou zkouškou pro zjištění mechanických charakteristik je zkouška tahem. Zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením, až do přetržení. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10°C do 35°C.

Podle průřezu dělíme zkušební tyče na ploché a válcové, dále z hlediska jejich geometrie na poměrné a nepoměrné. Rozhodujícím kritériem je následující vztah mezi počáteční měřenou délkou L_0 a plochou počátečního průřezu S_0 :

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$$

kde koeficientu k , obvykle přiřazujeme hodnotu 5,65 pro L_0 větší než 20 mm. Pokud tyč splňuje tento předpis, hovoříme o tyči poměrné, v opačném případě, kdy je počáteční délka nezávislá na počátečním průřezu, se jedná o tyč nepoměrnou. Poměrné válcové tyče dále dělíme na krátké a dlouhé.[19][20]

Tahový diagram a parametry určované tahovou zkouškou

Naměřená data představují závislost mezi působící silou a prodloužením vzorku, resp. mezi napětím a deformací. Jejich grafickým záznamem je tahový diagram, označovaný také jako pracovní diagram. Na jeho vodorovné ose je poměrná délková deformace ε , na svislé ose napětí σ , resp. smluvní napětí R . Poměrná délková deformace je definována takto:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} [-] \quad \text{nebo} \quad \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

kde L_0 je počáteční délka a L aktuální délka v určitém okamžiku během zatěžování.

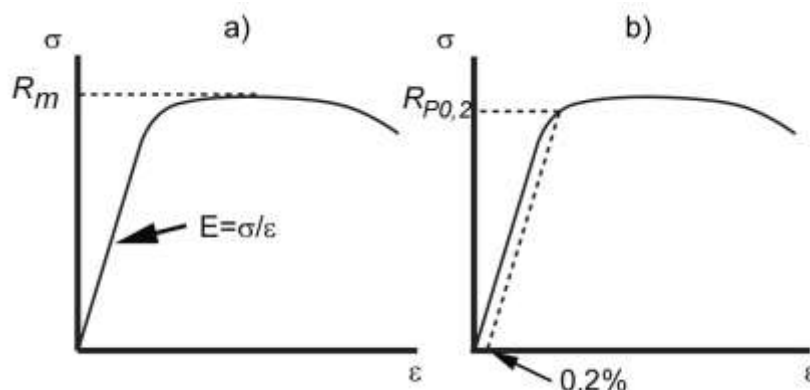
Napětí se vypočítá ze vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]}$$

přičemž F je vnější síla působící na těleso. Je kladen důraz na to, že se jedná o napětí smluvní, vypočítané ze síly vztažené na počáteční nedeformovaný průřez S_0 . Všechny zbylé významné hodnoty napětí, měřené během zkoušky tahem, tj. mez kluzu a mez pevnosti, jsou také smluvní, definované analogicky. Skutečné napětí je vzhledem ke zmenšujícímu se průřezu větší a pro popis jeho závislosti na skutečné deformaci používáme složitější empirické vztahy.[18][21][23]

Důležitým parametrem odpovídajícím maximálnímu smluvnímu napětí, které může být na daný materiál v tahu aplikováno, je mez pevnosti v tahu R_m . Mezi pevnosti tedy nemusí odpovídat poslední bod tahového diagramu. Pokles tahové křivky v poslední části, který nastává u některých materiálů, je způsoben lokálním zaškrcením zkušební vzorku, při kterém klesá síla a tudíž smluvní napětí nutné k deformaci. Mez kluzu je smluvní napětí, při kterém začíná trvalá (plastická) deformace zkušební tyče. Je to důležitý údaj, který omezuje velikost provozního namáhání dané součásti tak, aby nedošlo k jejím nevratným deformacím. U řady materiálů je přechod mezi lineární (elastickou) oblastí a nelineární (plastickou) oblastí v tahovém diagramu plynulý a neostrý. Začátek plastické deformace nelze zcela přesně určit a v takových případech je proto definována tzv. smluvní mez kluzu, což je smluvní napětí, při kterém plastická deformace dosáhne předepsané hodnoty, nejčastěji 0,2 %. Smluvní mez kluzu se pak označuje $R_{p0,2}$. [20][23]

Odečtení této veličiny z tahového diagramu se provádí tak, že hodnotou 0,2 % na horizontální ose vedeme rovnoběžku s lineární částí křivky a průsečík této rovnoběžky s tahovou křivkou definuje hodnotu $R_{p0,2}$. (Obr. 12)



Obrázek 12: Odečtení základních mechanických vlastností materiálů z tahového diagramu:

a) modul pružnosti v tahu E a mez pevnosti v tahu R_m , b) smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$.

Plastické vlastnosti materiálu charakterizuje tzv. tažnost A , což je trvalá relativní deformace po přetržení zkušební tyče. Její výpočet se provádí dle rovnice:

$$A = \frac{L_{\max} - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

ve které veličina L_{\max} znamená maximální délku zkušební tyče po přetržení.

Vedle tažnosti se k vyjádření plastických vlastností používá ještě tzv. kontrakce Z , která se vztahuje k průřezu zkušební tyče S a je definována jako:

$$Z = \frac{S_0 - S_{\min}}{S_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

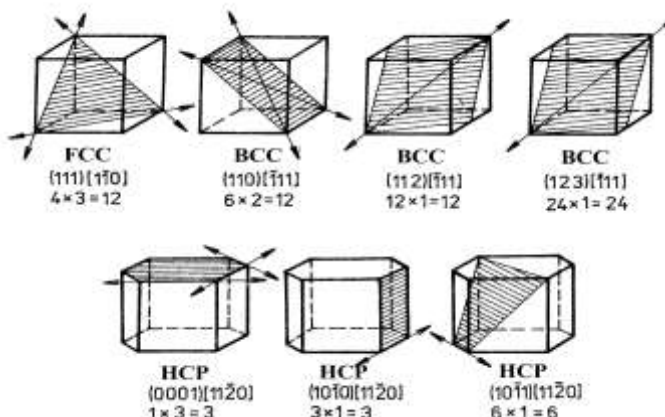
kde S_0 je počáteční průřez tyče a S_{\min} nejmenší průřez po přetržení.

Tahová zkouška končí, jak již bylo řečeno, přetržením zkušební tělesa. Nastává tedy plastická deformace (tato deformace je již trvalá). Celková deformace je tvořena elastickou (vratnou) a plastickou (nevratnou) deformací, jak můžeme vyjádřit ve vzorci: $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$. V okamžiku přetržení tělesa nám zaniká elastická deformace a zůstává jen plastická. [18][23]

Plastická deformace probíhá po kluzných rovinách (Obr. 13).

Tyto skluzu probíhají:

- ve směru z nejhustěji obsazenými atomy
- v rovině z nejhustěji obsazenými atomy
- v rovině či směru s maximálním smykovým napětím



Obrázek 13: Skluzové systémy [22]

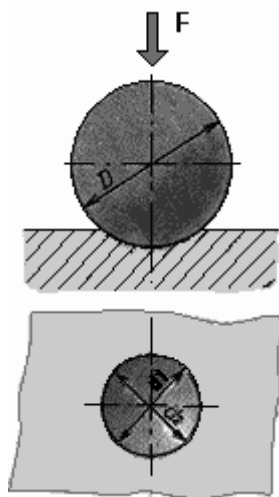
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti u zkoušky tahem [20]

Pevnostní indexy	Mez kluzu	$R_{\varepsilon} = \frac{F_{\varepsilon}}{S_0} [\text{MPa}]$
	Mez kluzu-horní	$R_{\varepsilon H} = \frac{F_{\varepsilon H}}{S_0} [\text{MPa}]$
	Mez kluzu-dolní	$R_{\varepsilon L} = \frac{F_{\varepsilon L}}{S_0} [\text{MPa}]$
	Mez kluzu-smluvní	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [\text{MPa}]$
	Mez pevnosti	$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}]$
Deformační indexy	Tažnost	$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} * 100 [\%]$
	Kontrakce	$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 [\%]$

2.6.3. Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkoušky tvrdosti jsou oblíbené a výhodné z hlediska relativní jednoduchosti provedení a velmi často vedou k rychlému získání výsledku bez nutnosti odběru vzorku, jak je tomu u zkoušky tahem. U hliníku a jeho slitin se velmi často používá měření podle Brinella. Tvrdost podle Brinella se zjišťuje vtlačováním ocelové kalené kuličky o průměru D do zkušebního tělesa silou F , která směřuje kolmo k povrchu tělesa po stanovenou dobu (Obr. 14). Následně se po odlehčení změří průměr vtisku d . [18][21][23]

Průměr D bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce t měřeného materiálu. Platí, že minimální tloušťka materiálu, je desetinásobek hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky.



Obrázek 14: Průběh vtlačování indentoru [23]

Doba působení síly o dané velikosti závisí na struktuře materiálu. Měkčí materiály se zatěžují delší dobu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. U neželezných slitin od 10 do 180 s.

Hodnota tvrdosti se určí jako poměr zatěžující síly a plochy vtisku, neformálně ji lze proto považovat za určitou hodnotu napětí. Výpočet probíhá takto: výsledný průměr vtisku d se spočítá jako aritmetický průměr ze dvou dílčích průměrů d_1 a d_2 navzájem kolmých, poté se pomocí tabulek uvedených v normě určí v závislosti na materiálu hodnota poměru:

$\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ a známé hodnoty d , D , F se dosadí do vztahu: [23][24]

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$



3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. POPIS POUŽITÉ SLITINY NA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro tuto diplomovou práci byla vybrána slitina na bázi Al-Cu, legovaná především niklem, kobaltem, antimonem a zirkonem. Jedná se tedy o žárovečnou slitinu. Technické označení pro tuto slitinu je RR.350, dle německé normy též ALUFOND 60 a dle britské HIDUMINIUM. Slitina (G – AlCu5NiCoSbZr) má předepsané chemické složení (tabulka č. 6).

Tabulka 6 Chemické složení slitiny RR.350 (hm.%)

Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Ni %	Zn %
0.368	4.731	0.310	0.034	1.937	0.126
Ti %	Pb %	Sn %	Co %	Cr %	Al %
0.117	0.011	0.042	0.203	0.007	92.115

Jak je vidět, tato slitina je bohatá na přísadové prvky. Některé prvky mají vliv na primární strukturu a některé zase mohou zlepšit vlastnosti (mechanické). Tato slitina se využívá pro různé strojní součásti, pracující za zvýšených teplot, zvláště pro případy cyklických změn teplot v průběhu provozního využívání odlitků. Lze ji použít do provozních teplot až 350°C. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je omezená odolnost proti korozi, způsobená přítomností niklu a mědi. Vytváří také rozptýlené staženiny, mimo jiné i dutiny všech druhů.

3.2. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Tavba a následné odlití všech vzorků bylo realizováno v dílenském zařízení VŠB – TU Ostrava.

Bylo odlito celkem 48 vzorků v rozmezí licích teplot 660°C až do 860°C do kovové formy tzv. dvoudílné kokily (obr. 15). Hotový odlitek se skládal z vtokové soustavy, samotné zkušební tyče, která byla následně použita na mechanické a metalografické hodnocení a nálitkem. (obr. 17).

Samotná tavba se prováděla v odporové peci (obr. 16), za použití grafito-šamotového kelímku. Prvotní vsázka k tavbě byla ze slévárenských housek přesného chemického složení (tab. 6). Pak následovalo přetavování z vratného materiálu předchozích taveb (vtoková soustava, nálitkem), aby se mohly vyhodnotit jak mechanické změny, tak změny ve struktuře při opakovaných přetavbách. Odlité zkušební vzorky byly volně ochlazovány na vzduchu.



Obrázek 16: Tavící agregát[25]



Obrázek 15: Dvoudílná kokila[25]



Obrázek 17: Odlitek zkušební tělesa[25]

Tabulka 7 Vzorky pro metalografické vyhodnocení

Tavba	Číslo vzorku	Teplota lití [°C]	Teplota formy [°C]
Tavba č. I	Vzorek č.14	700°C	457°C
	Vzorek č.28	780°C	515°C
	Vzorek č.31	750°C	363°C
Tavba č. II	Vzorek č.40	850°C	355°C
	Vzorek č.42	750°C	428°C
	Vzorek č.52	690°C	464°C
Tavba č. III	Vzorek č.82	748°C	526°C
	Vzorek č.84	675°C	520°C
	Vzorek č.90	860°C	216°C
Tavba č. IV	Vzorek č.101	750°C	515°C
	Vzorek č.104	680°C	550°C
	Vzorek č.112	810°C	555°C

3.3. METALOGRAFICKÝ VÝBRUS VZORKŮ

Cílem porovnání struktury metalografických vzorků je získat co nejvíce informací o struktuře materiálu, všeobecné informace o jednotlivých mikrolokalitách vnitřní struktury materiálu a informace o metalurgické čistotě materiálu. Na základě toho, jaké informace o struktuře potřebujeme získat, a do jaké hloubky je následně využijeme, volíme odpovídající metody metalografických hodnocení a pozorování.

Struktury hliníkových slitin jsou tvořeny tuhým roztokem základního kovu (hliníku), jenž je tvořen dendritickými buňkami či dendrity. U metalografického výbrusu to jsou bílé plošky orientovaných dendritů nebo dendritických buněk dané roviny. Každé zrno je tvořeno jedním či více dendrity a dalšími složkami, které jsou na eutektické nebo peritektické bázi, dle typu rovnovážného diagramu určitého prvku a jejich vzájemné interakci.

Pomocí optické mikroskopie je možné získat následující informace o struktuře hliníkových slitin:

- charakter přítomných intermetalických fází – tvar, typ, velikost a rozložení,
- hodnocení mikročistoty materiálu,
- hodnocení kvality homogenizace,
- charakter a velikost zrna,
- mikroskopické heterogenity materiálu – obohacená zóna, hrubé fáze atd.,
- vady mikrostruktury způsobené technologií – porezita, přehřátí materiálu atd.

Příprava vzorků pro metalografické vyhodnocení

Řezání a příprava metalografických vzorků byla prováděna na pracovišti Ústavu materiálového inženýrství VŠB – TU Ostrava. Vzorky byly odřezány ze zkušebních tyčí, následovalo broušení vzorků na horizontální vodou chlazená bruska (Obr. 18) se smirkovým papírem a odstupňovanými hrubostmi 60, 120, 320, 600, 800, 1200 a 2500.



Obrázek 18: Horizontální vodou chlazená bruska[25]

Po vybroušení bylo provedeno samotné doleštění na leštícím horizontálním stroji za použití leštidla na bázi hlinitanu. Poté se vyleštěný vzorek omyl proudem vody, postříkal technickým lihem a následně se sušil proudem vzduchu. Takto připravený vzorek mohl přejít k samotné fázi naleptání struktury.

Tabulka 8: Chemické složení leptadla na hliníkové slitiny

SLOŽKA	Destilovaná voda	HF (Kyselina fluorovodíková)
MNOŽSTVÍ	100ml	0,5ml

Celková doba leptání byla 4s, následoval oplach pod proudem tekoucí vody, opět polití technickým lihem k odstranění zbytku vody a sušení v proudu vzduchu.

Následovalo samotné pozorování struktury všech dvanácti vzorků pod mikroskopem OLYMPUS GX51 (Obr. 19) se zvětšením 100, 500, 1000x a jejich fotodokumentace.

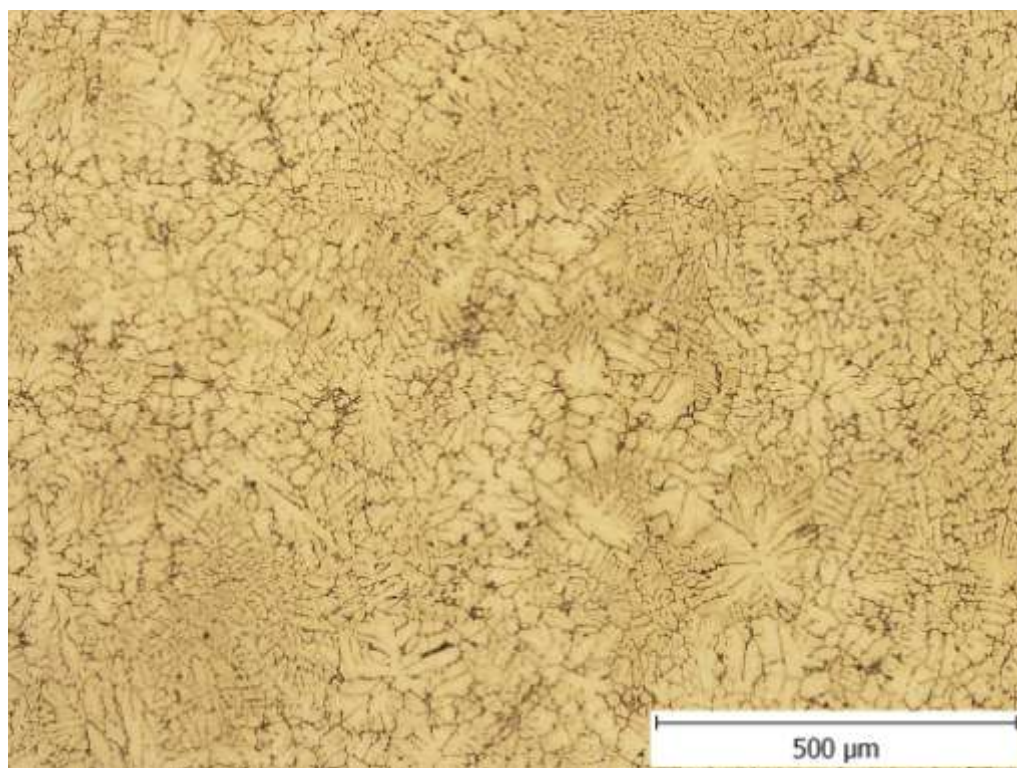


Obrázek 19: Olympus GX51[26]

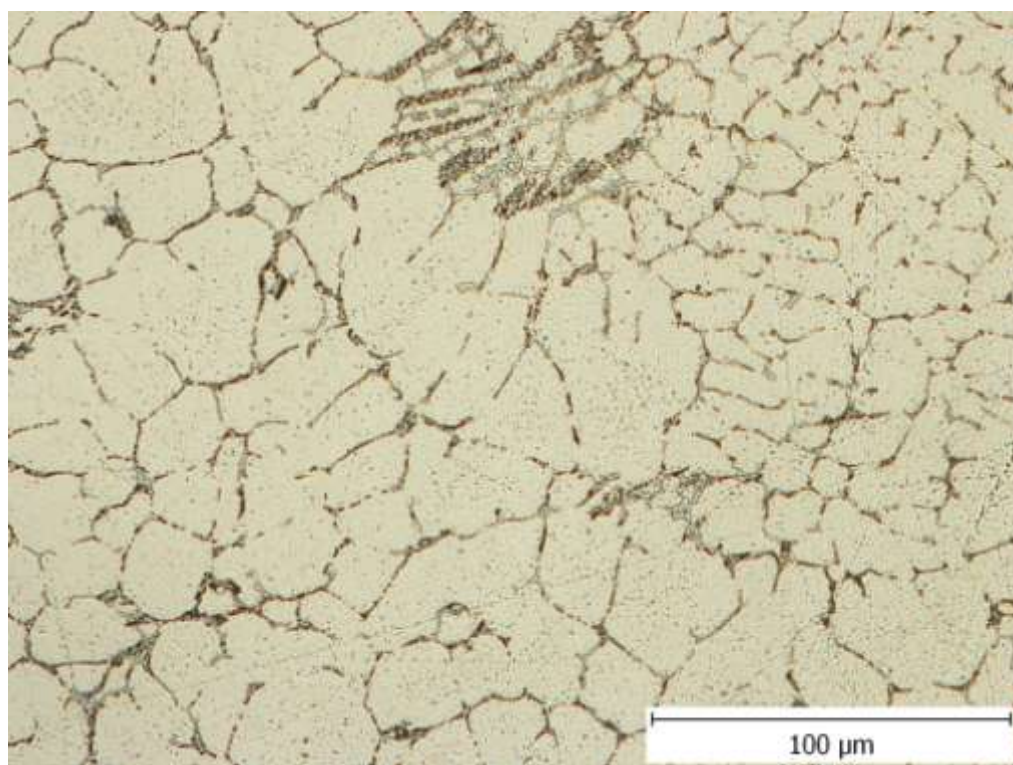
3.4. Zhodnocení struktury pomocí metalografických výbrusů slitiny RR.350

3.4.1. I. TAVBA

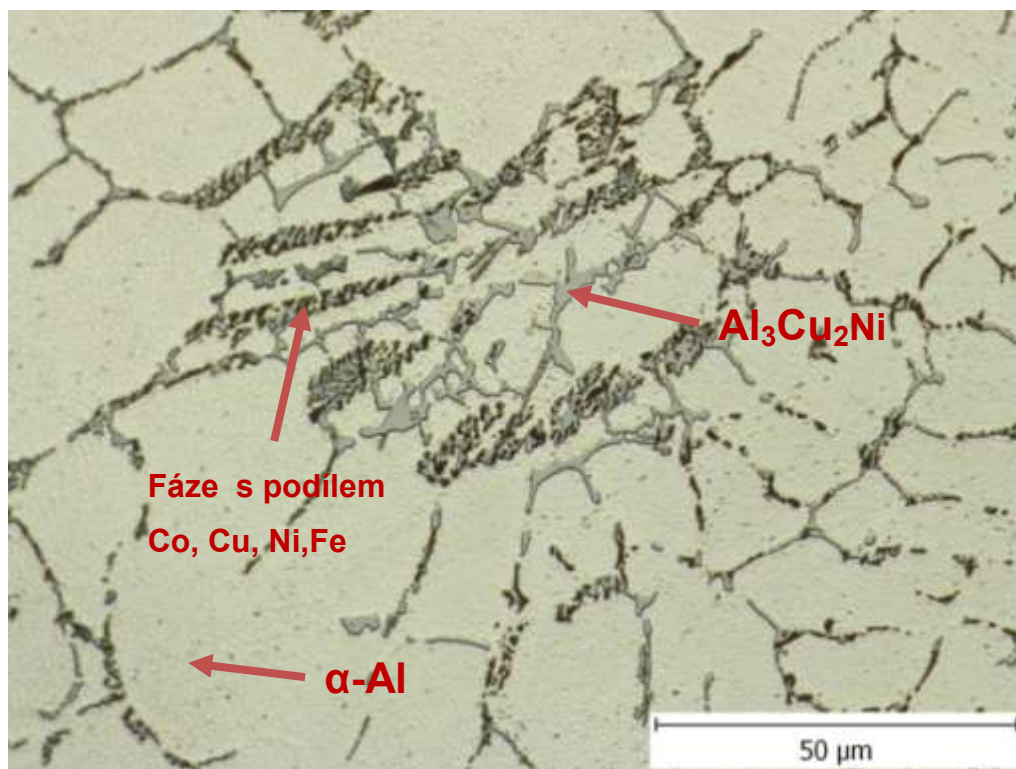
Vzorek č. 14 $T_{\text{lití}} - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 457\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 20: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 100x



Obrázek 21: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 500x

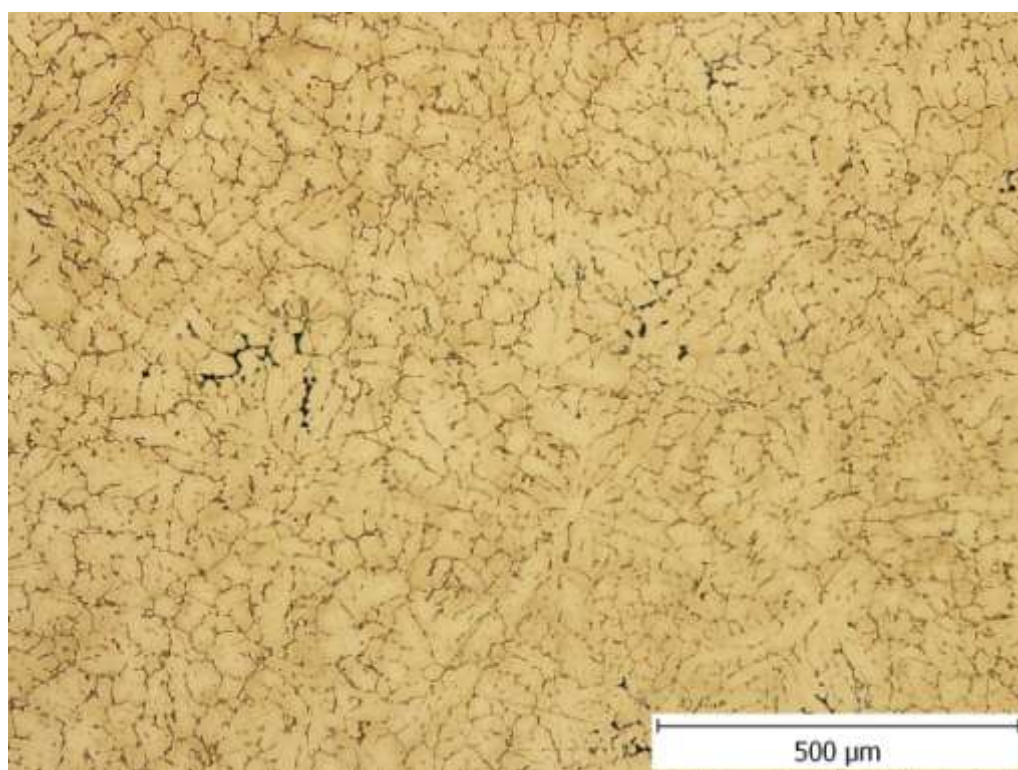


Obrázek 22: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 1000x

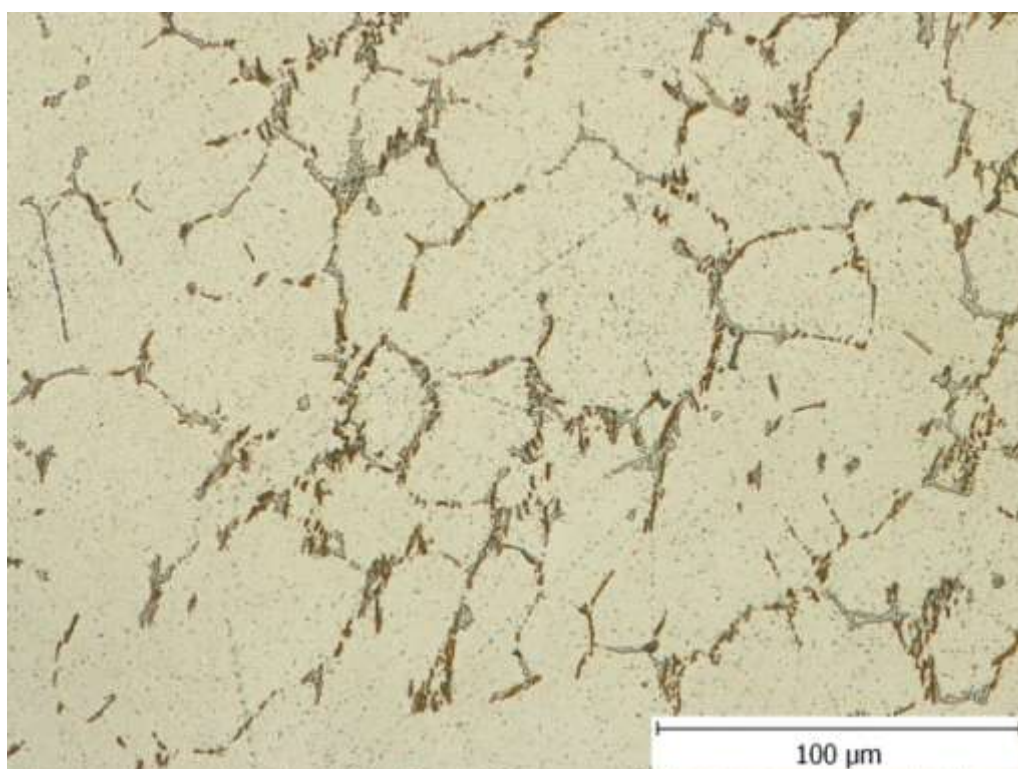
3.4.1.1. Vyhodnocení vzorku č. 14

Mikrostruktura vzorku č. 14 (Obr. 20) je tvořena dendrity. Struktura (Obr. 22) vykazuje fázi šedé barvy bohaté především na nikl a měď. Jedná se o fázi, která zvyšuje žáropevnost dané slitiny, tzv. fáze T - $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Ni}$. Vidíme zde ještě fázi tmavě hnědé barvy s větším podílem kobaltu, mědi, niklu a železa.

Vzorek č. 28 $T_{\text{liti}} - 780\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 515\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 23: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 100x



Obrázek 24: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 500x

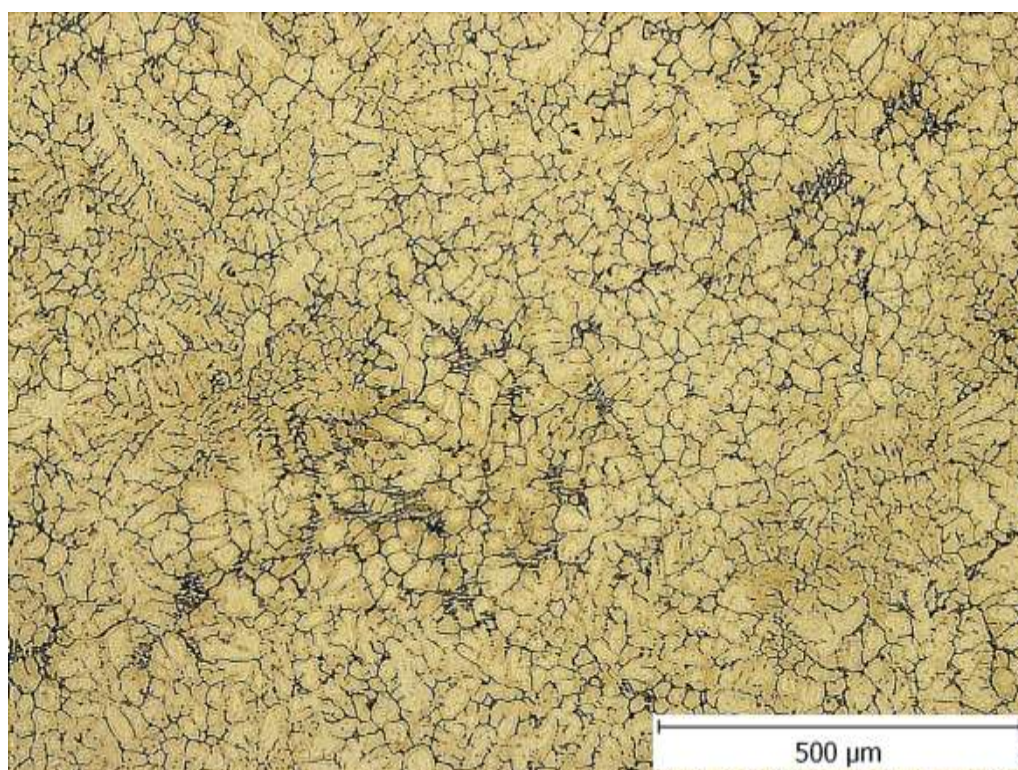


Obrázek 25: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 1000x

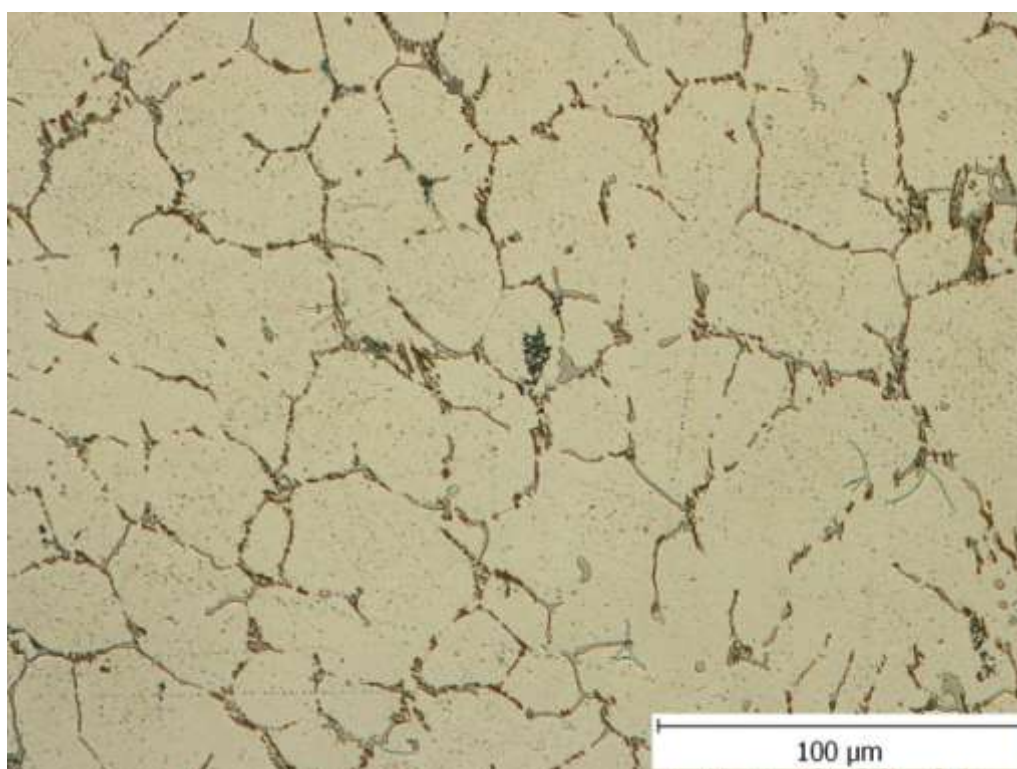
3.4.1.2. Vyhodnocení vzorku č. 28

Na mikrostruktuře (Obr. 23) se vyskytla opět dendritická struktura o něco hrubších dendritů. Je to zapříčiněno tím, že teplota lití a teplota formy je vyšší, než u předchozího vzorku. Na tomto snímku je vidět také pórovitost, kterou trpí tato slitina. Mikrostruktura (Obr. 25) opět vykazuje fáze T - $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Ni}$. Je zde patrná i fáze s vysokým obsahem antimonu černé barvy.

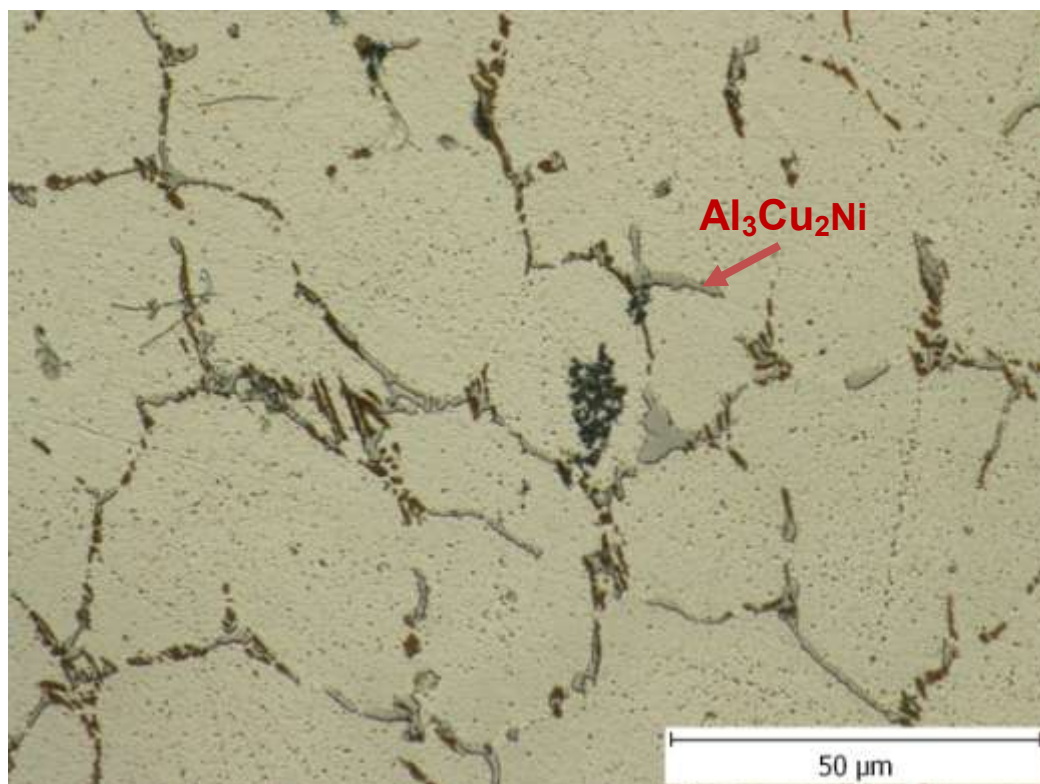
Vzorek č. 31 $T_{\text{liti}} - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 363\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 26: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 100x



Obrázek 27: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 500x



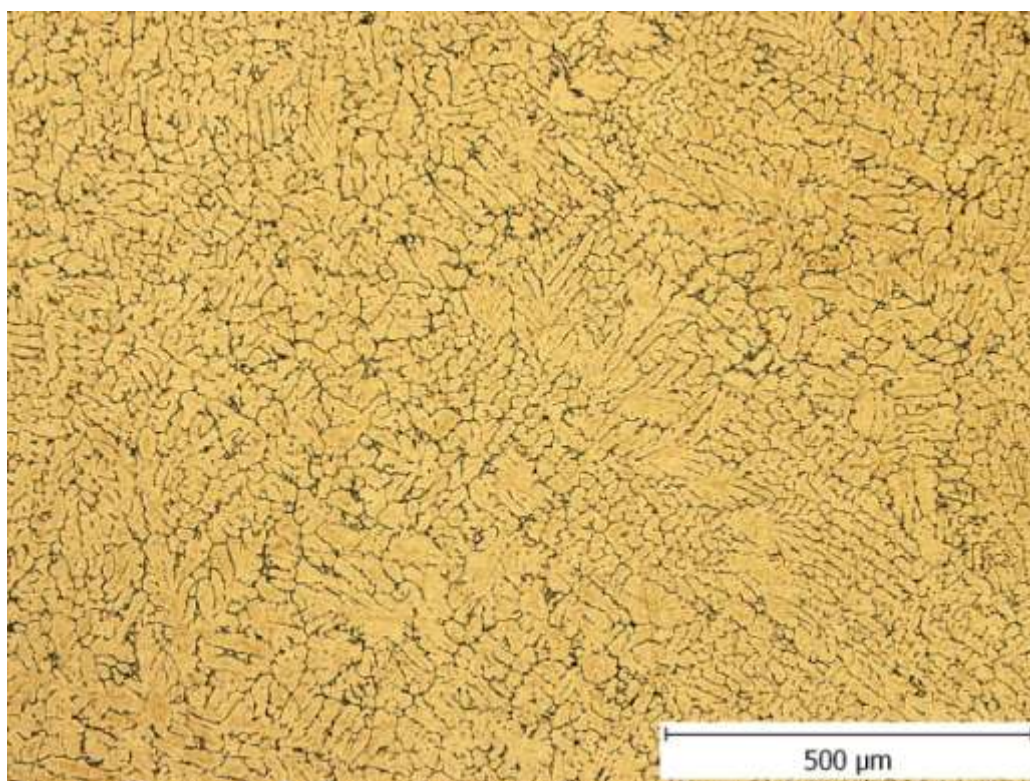
Obrázek 28: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 1000x

3.4.1.3. Vyhodnocení vzorku č. 31

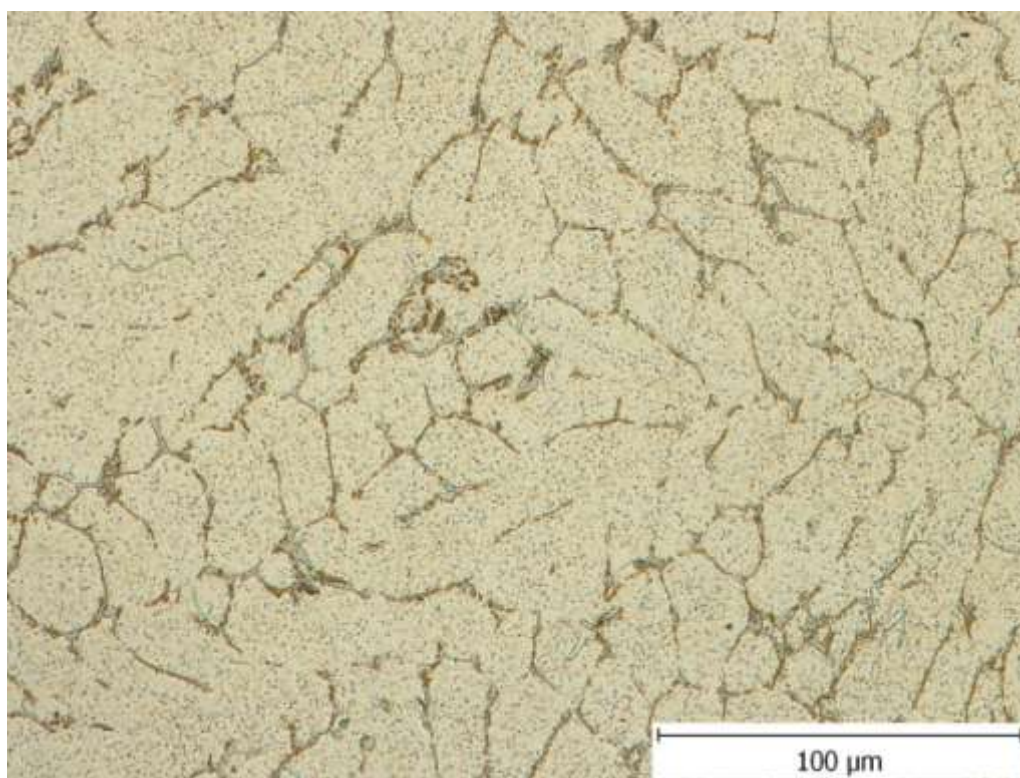
Mikrostruktura vzorku č. 31 je téměř totožná s předchozím vzorkem. Rozdíl je však v tom, že vykazuje jemnozrnnější morfologii zrna, díky nižší teplotě formy a také je zde patrné větší množství mikropórovitosti, než u předchozích vzorků.

3.4.2. II. TAVBA

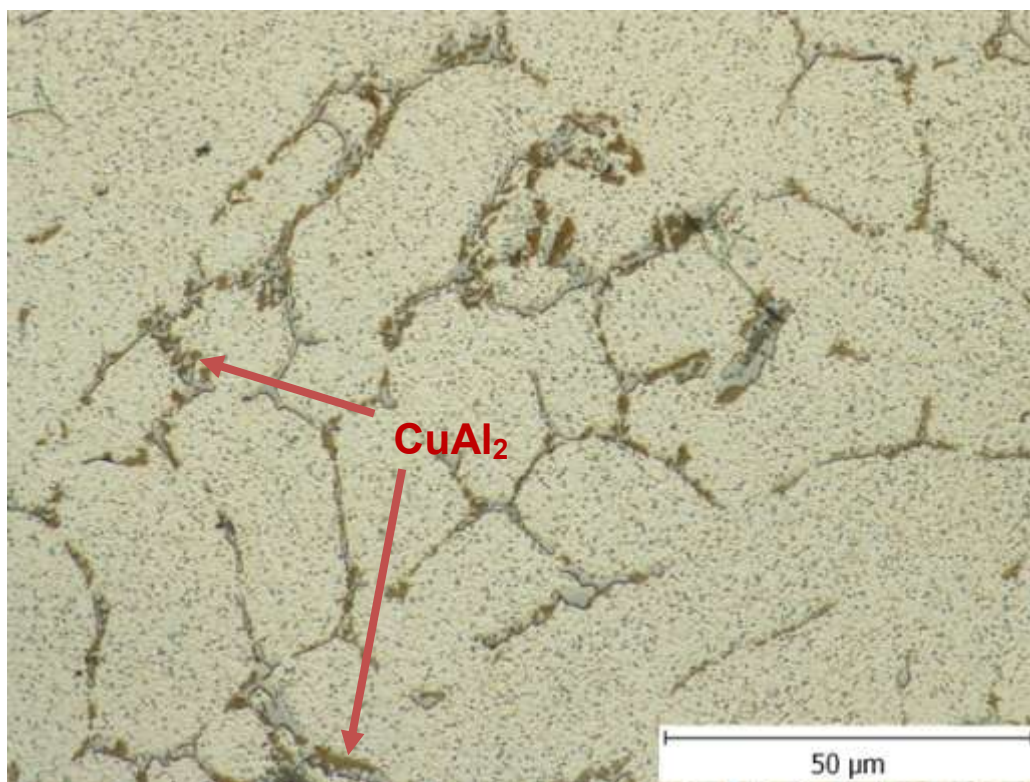
Vzorek č. 40 $T_{\text{lití}} - 850\text{ °C}$ $T_{\text{formy}} - 355\text{ °C}$



Obrázek 29: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 100x



Obrázek 30: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 500x

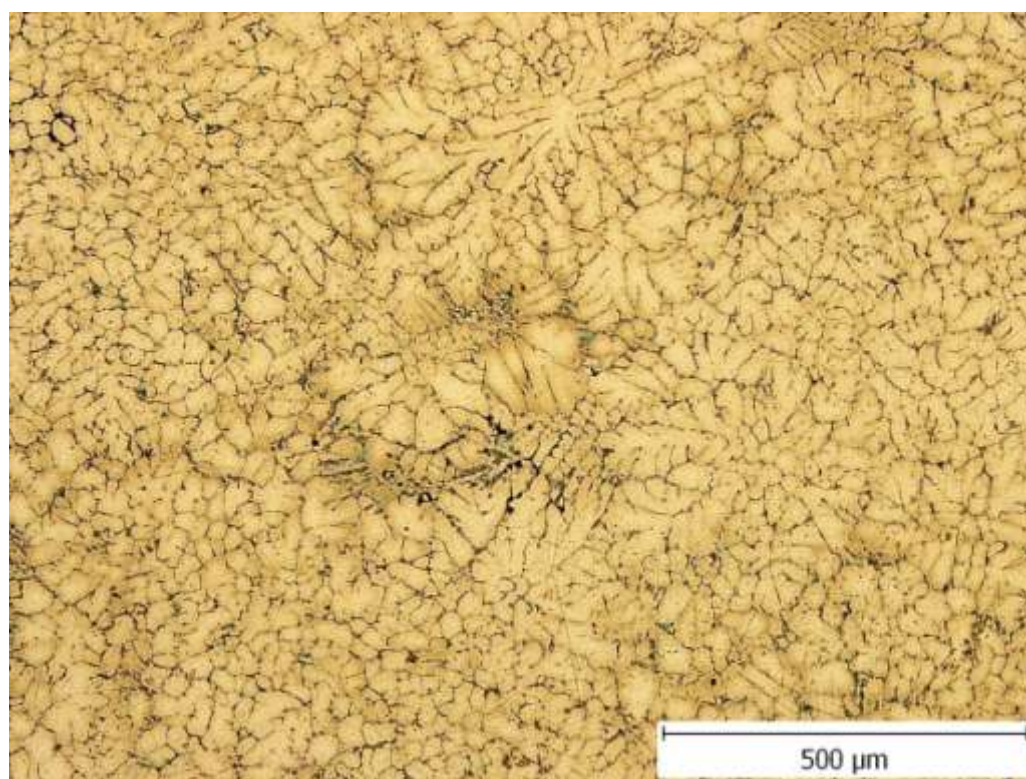


Obrázek 31: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 1000x

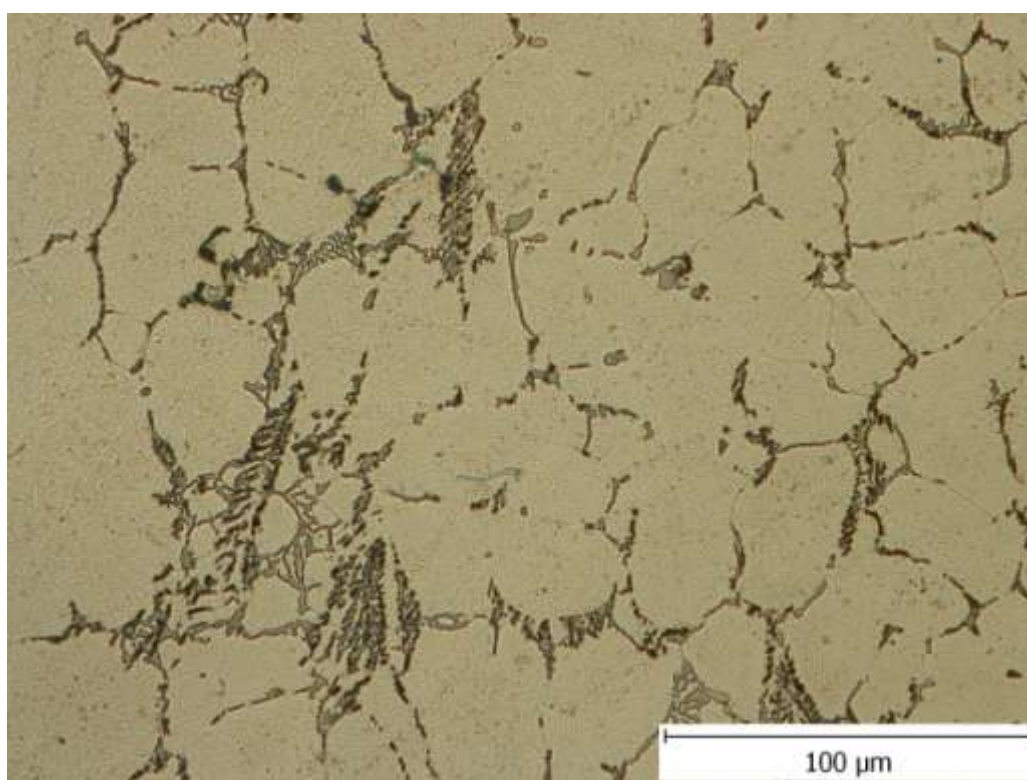
3.4.2.1. Vyhodnocení vzorku č. 40

Z obrázku (Obr. 29) vyplývá, že mikrostruktura vzorku je rozdílné zrnitosti (nestejnoměrné dendritické buňky). U zvětšení 500x (Obr. 30) vidíme znatelný úbytek fází s niklem, mědí a kobaltem. Mikrostruktura (Obr. 31) vykazuje fázi světle hnědé barvy CuAl_2 vylučující se po hranicích zrn.

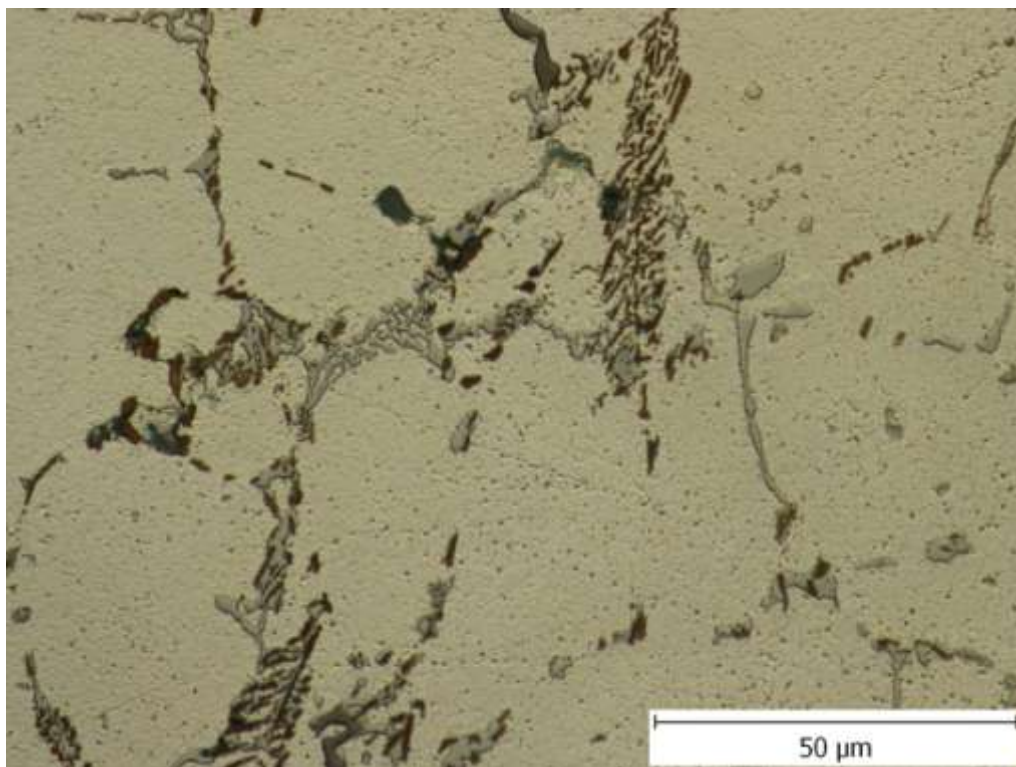
Vzorek č. 42 $T_{\text{liti}} - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 428\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 32: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 100x



Obrázek 33: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 500x

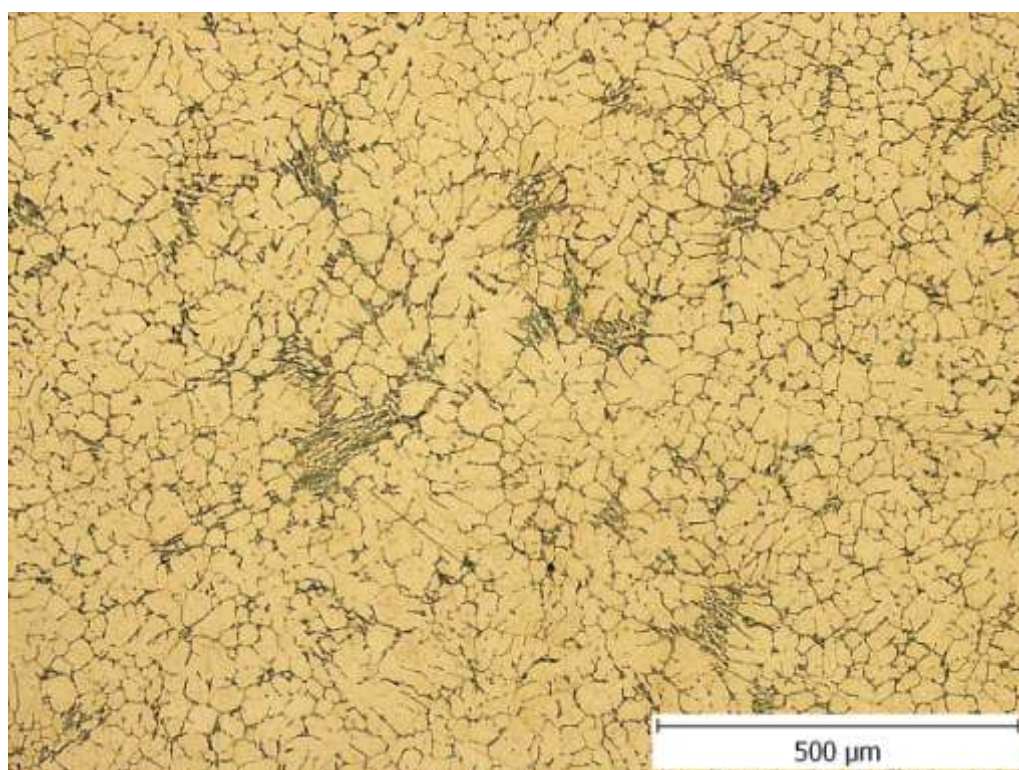


Obrázek 34: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 1000x

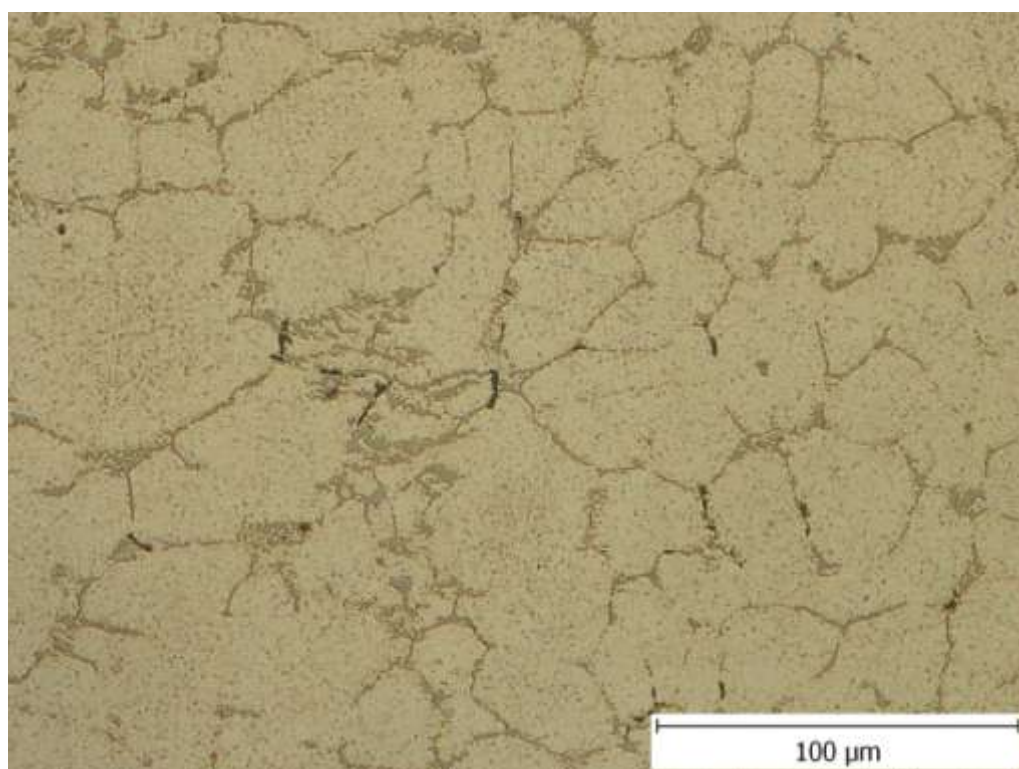
3.4.2.2. Vyhodnocení vzorku č. 42

U vzorku č. 42 je viditelná struktura se smíšenou zrnitostí. Na dalších snímcích (Obr. 33, 34) vidíme větší vylučování intermetalických fází po hranicích zrn. Jde o fáze bohaté na kobalt, měď, nikl, železo a také se zde objevují hrubé rozvětvené intermetalické fáze typu „čínské písmo“. Jedná se o fáze na bázi AlFeMn .

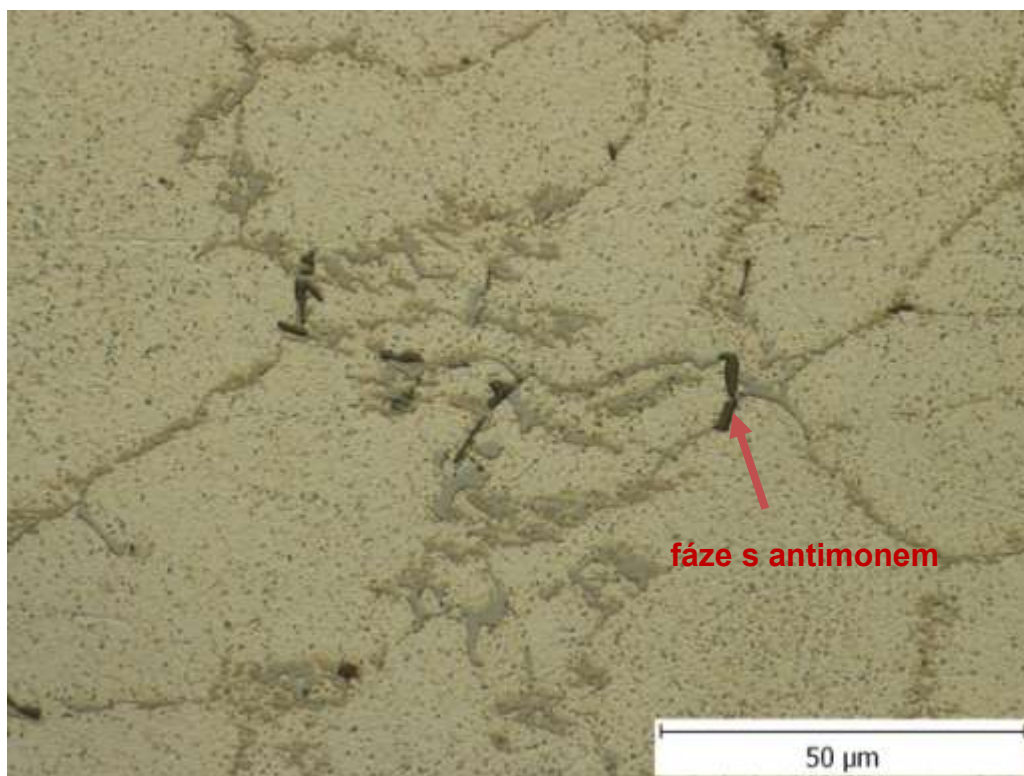
Vzorek č. 52 $T_{\text{liti}} - 690\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 464\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 35: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 100x



Obrázek 36: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 500x



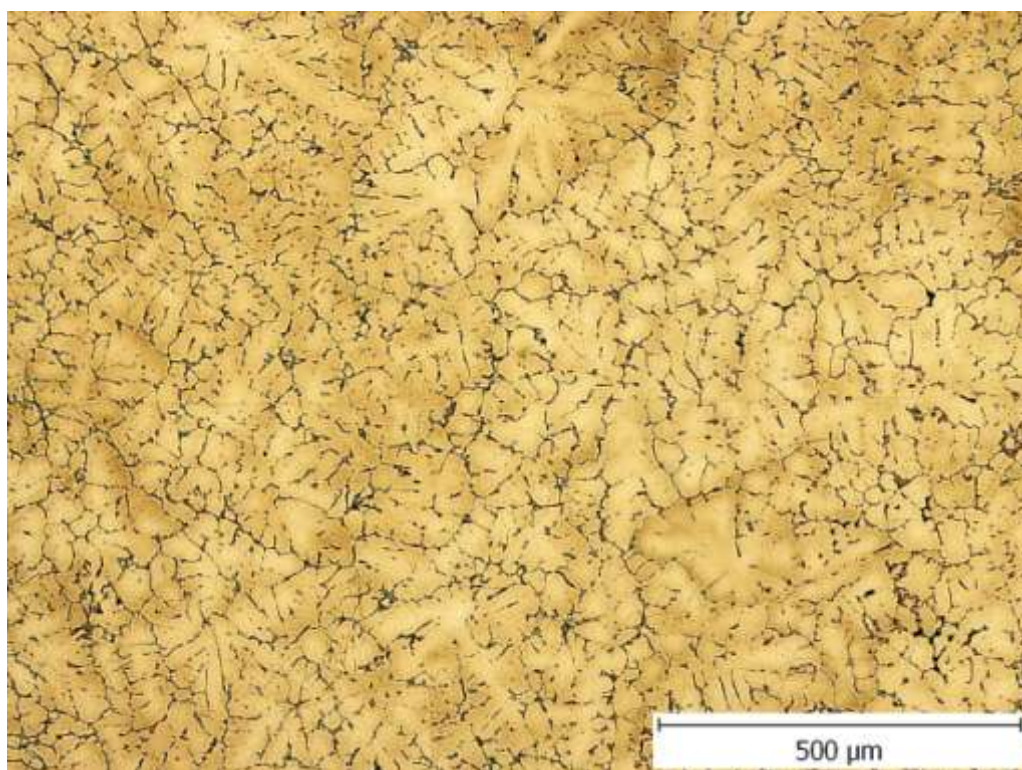
Obrázek 37: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 1000x

3.4.2.3. Vyhodnocení vzorku č. 52

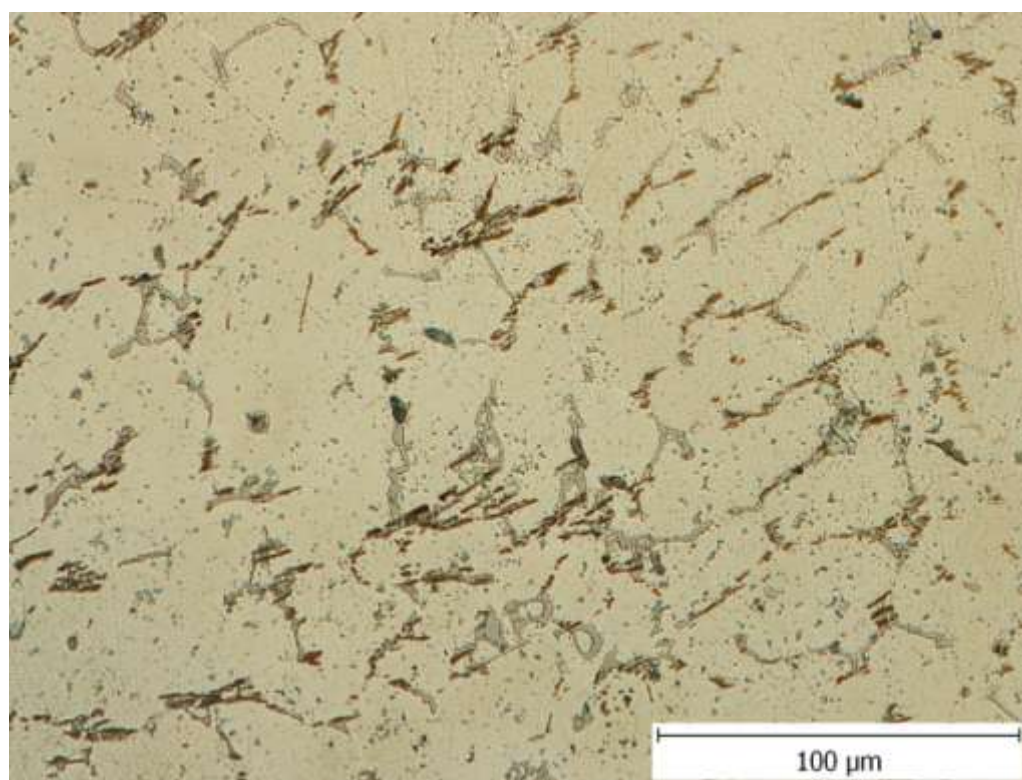
Na obrázku (Obr. 35) lze vidět opět určitou nestejnou strukturu, tvořenou z části zrnem a z části dendritickými buňkami a mikrostaženinami. Mikrostruktura (Obr. 37) ztelně vykazuje fáze s vysokým obsahem antimonu.

3.4.3. III TAVBA

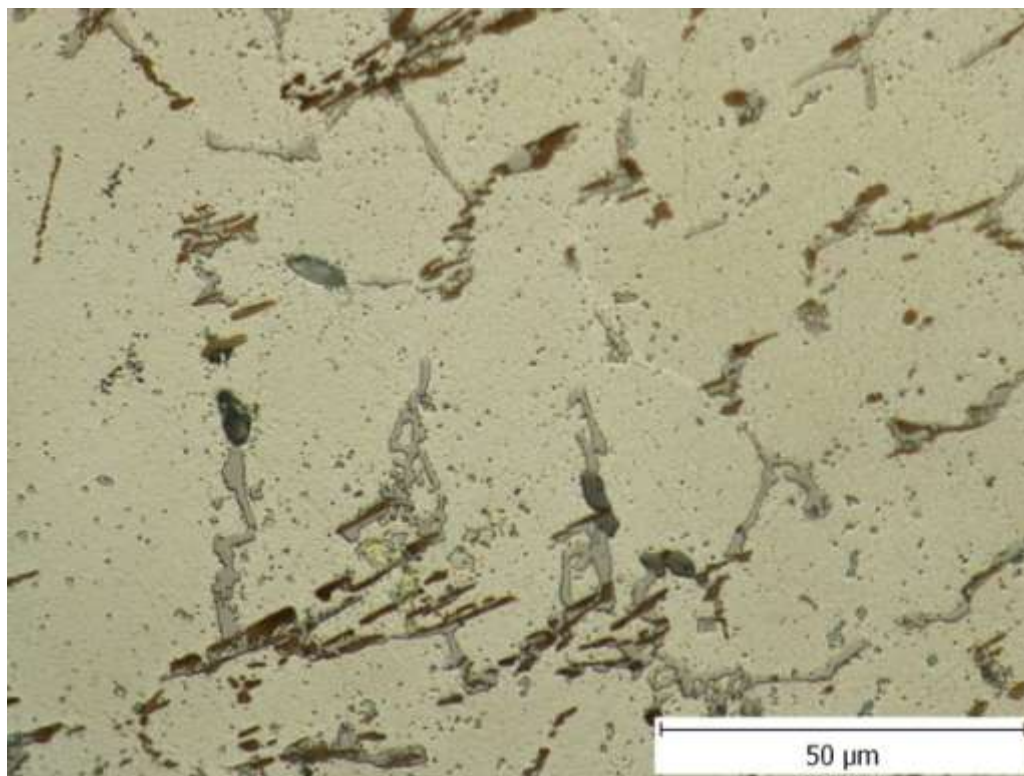
Vzorek č. 82 $T_{\text{lití}} - 748\text{ °C}$ $T_{\text{formy}} - 526\text{ °C}$



Obrázek 38: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 100x



Obrázek 39: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 500x

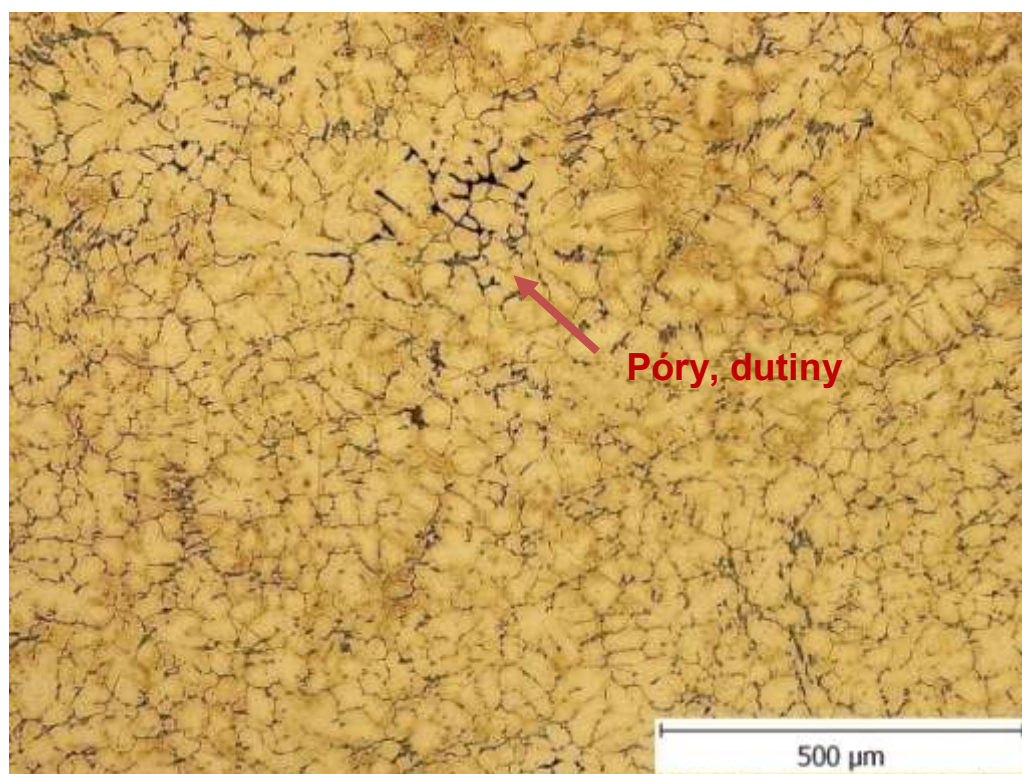


Obrázek 40: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 1000x

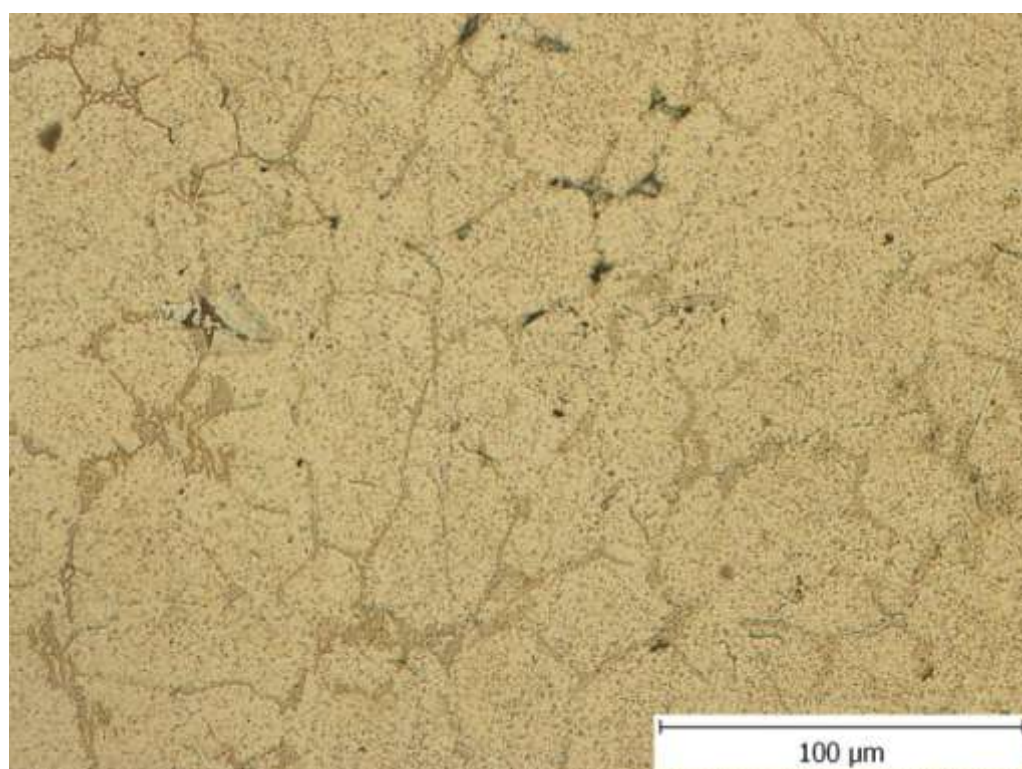
3.4.3.1. Vyhodnocení vzorku č. 82

Mikrostruktura (Obr. 38) vykazuje dendritický typ struktury a je zde patrná rozdílnost v zrnitosti. Na dalším zvětšení mikrostruktury (Obr. 40) vidíme fáze s vysokým obsahem antimonu. Dále jsou zde patrné fáze bohaté na kobalt, měď, nikl, železo (tmavě hnědé). Objevují se i fáze hnědé barvy CuAl_2 a šedé barvy $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Ni}$

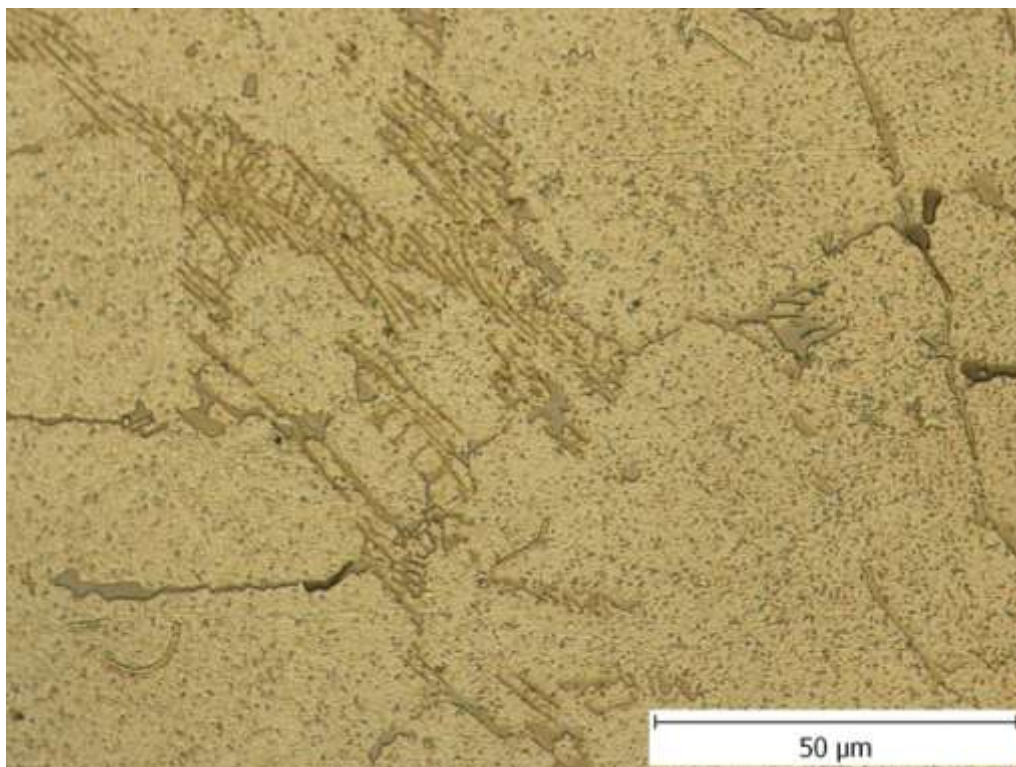
Vzorek č. 84 $T_{\text{liti}} - 675\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 520\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 41: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 100x



Obrázek 42: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 500x

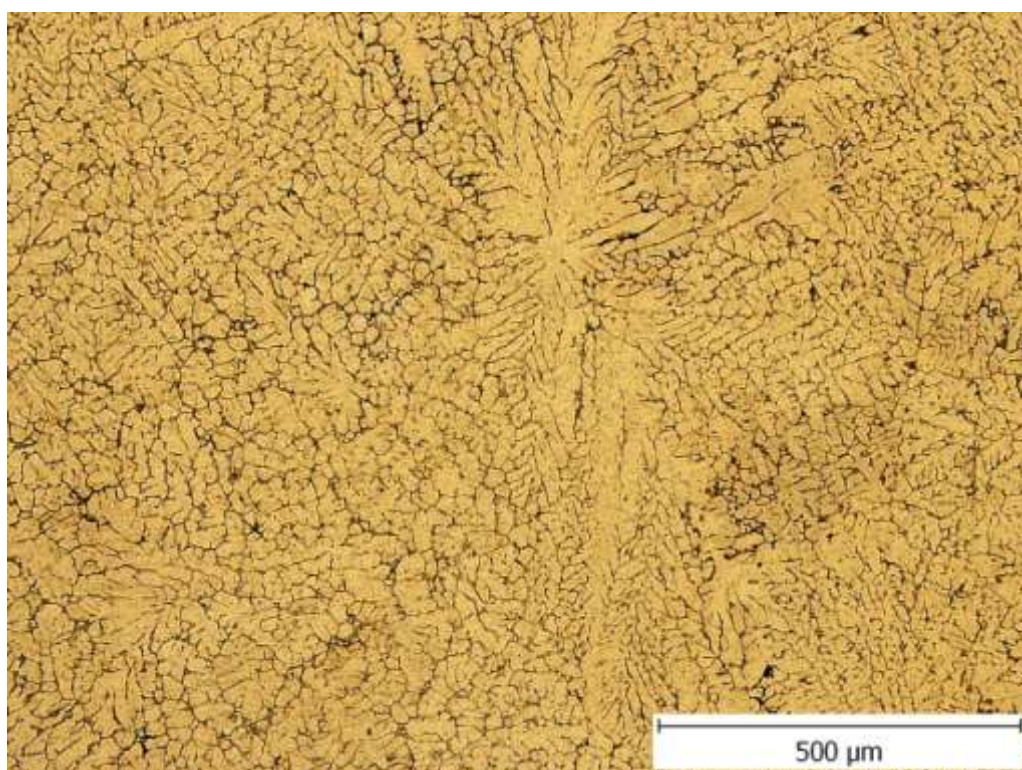


Obrázek 43: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 1000x

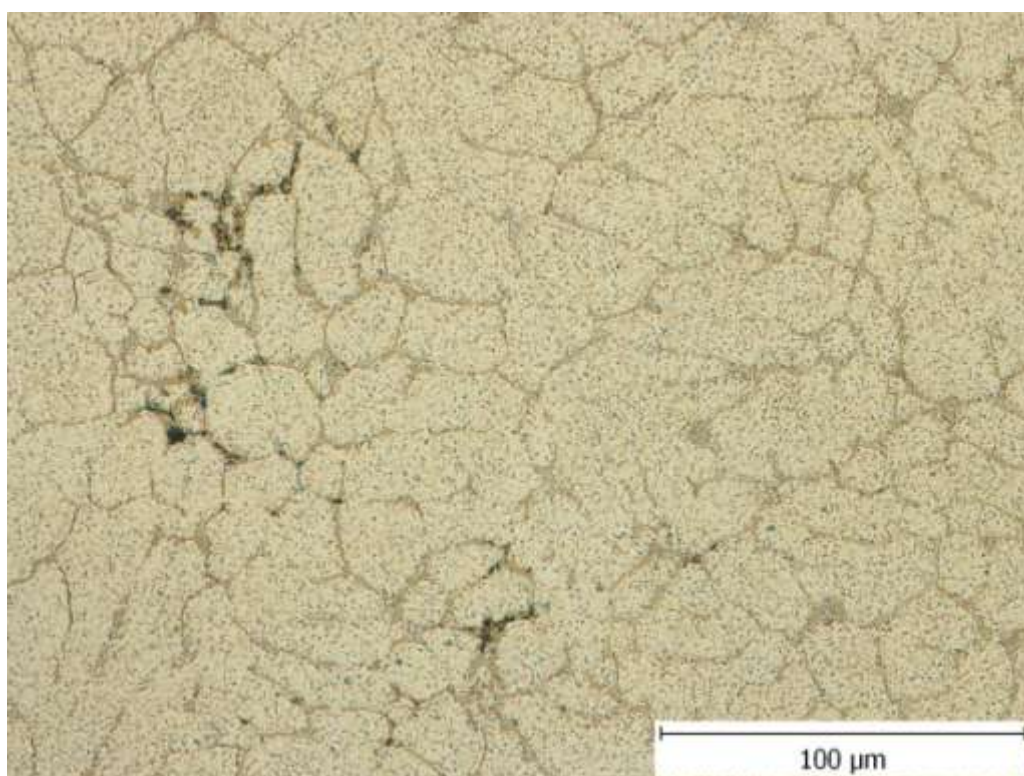
3.4.3.2. Vyhodnocení vzorku č. 84

Na obrázku (Obr. 41) vidíme poměrně vysoký obsah dutin s nestejnou strukturou. Z dalších snímků (Obr. 42, 43) je zřejmý úbytek jak fází bohatých na nikl, tak i fází s větším obsahem mědi a kobaltu.

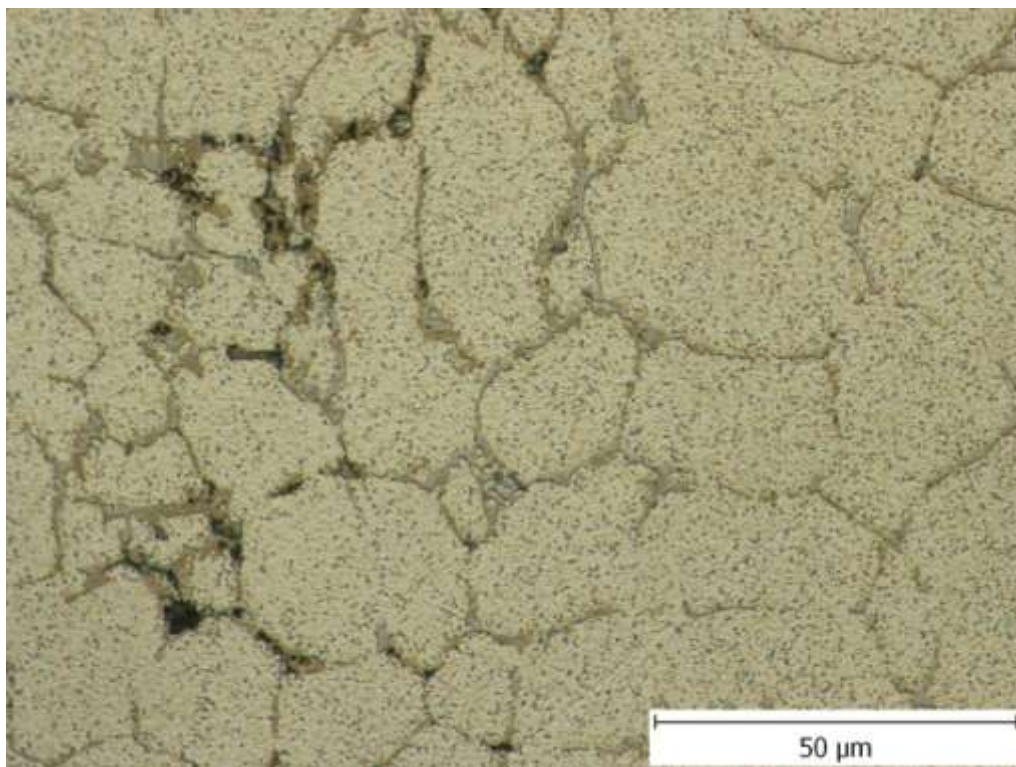
Vzorek č. 90 $T_{\text{lití}} - 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 216\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 44: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 100x



Obrázek 45: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 500x



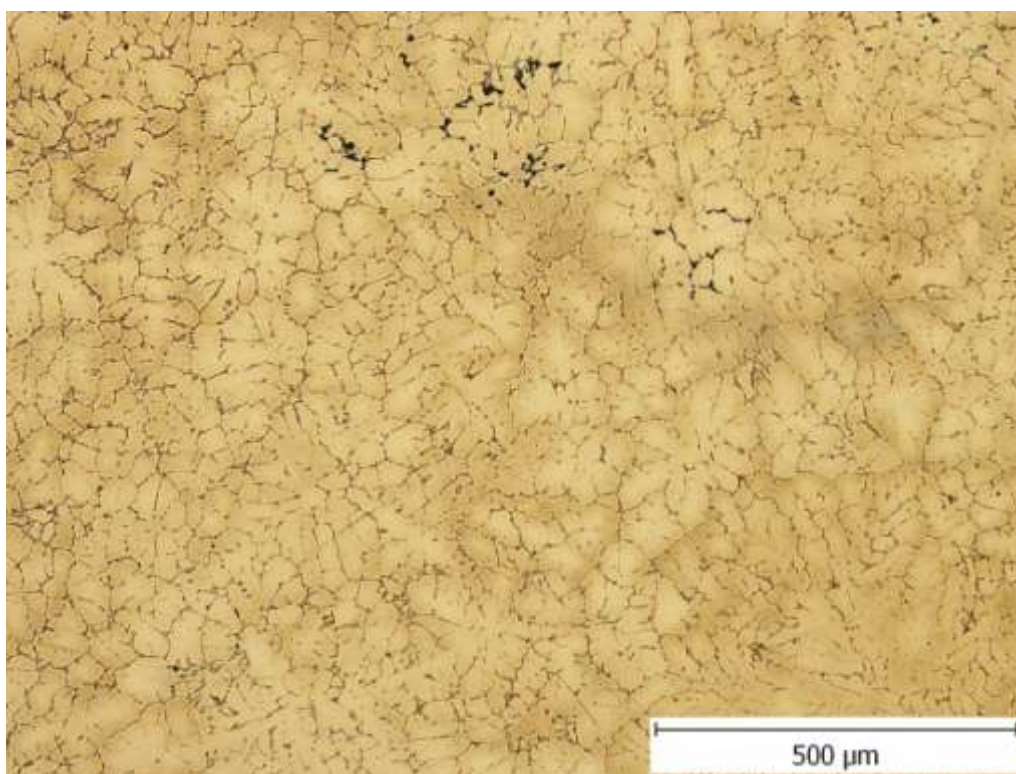
Obrázek 46: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 1000x

3.4.3.3. Vyhodnocení vzorku č. 90

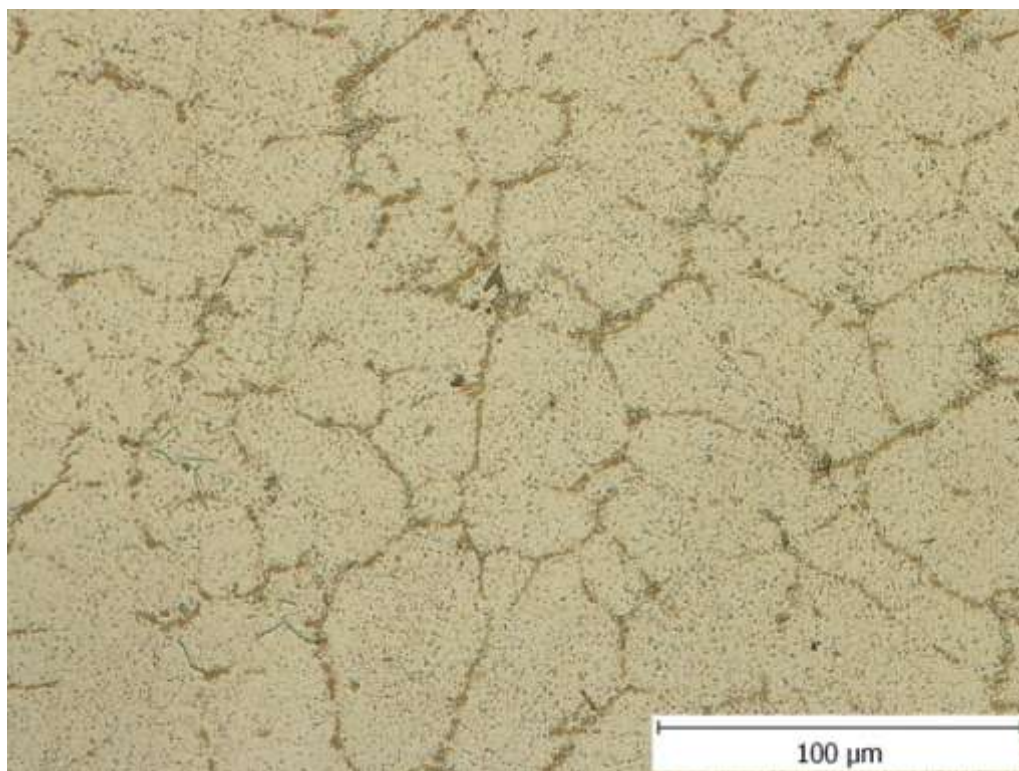
U vzorku č. 90 (Obr. 44, 45) je zřejmá nestejnoměrná struktura. Jedná se o shluky dendritických buněk, vyšší mikrosegregaci a opět vidíme zřetelně větší obsah dutin a mikropórovitosti, kterými tato slitina trpí.

3.4.4. IV. TAVBA

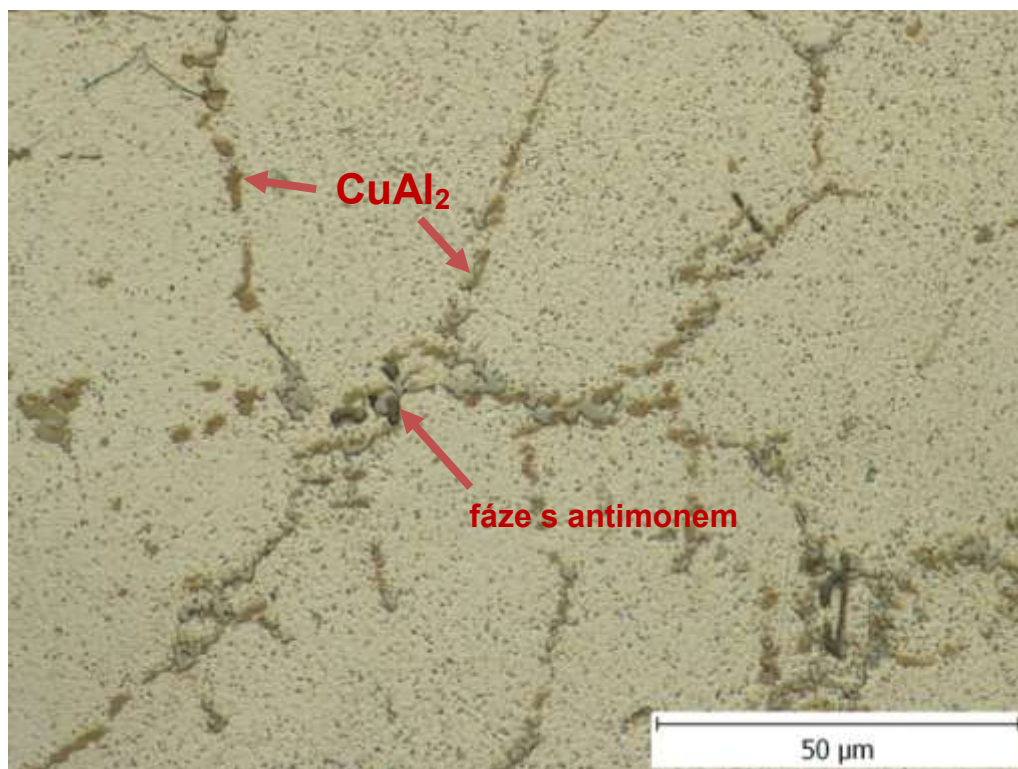
Vzorek č. 101 $T_{\text{lití}} - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 515\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 47: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 100x



Obrázek 48: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 500x

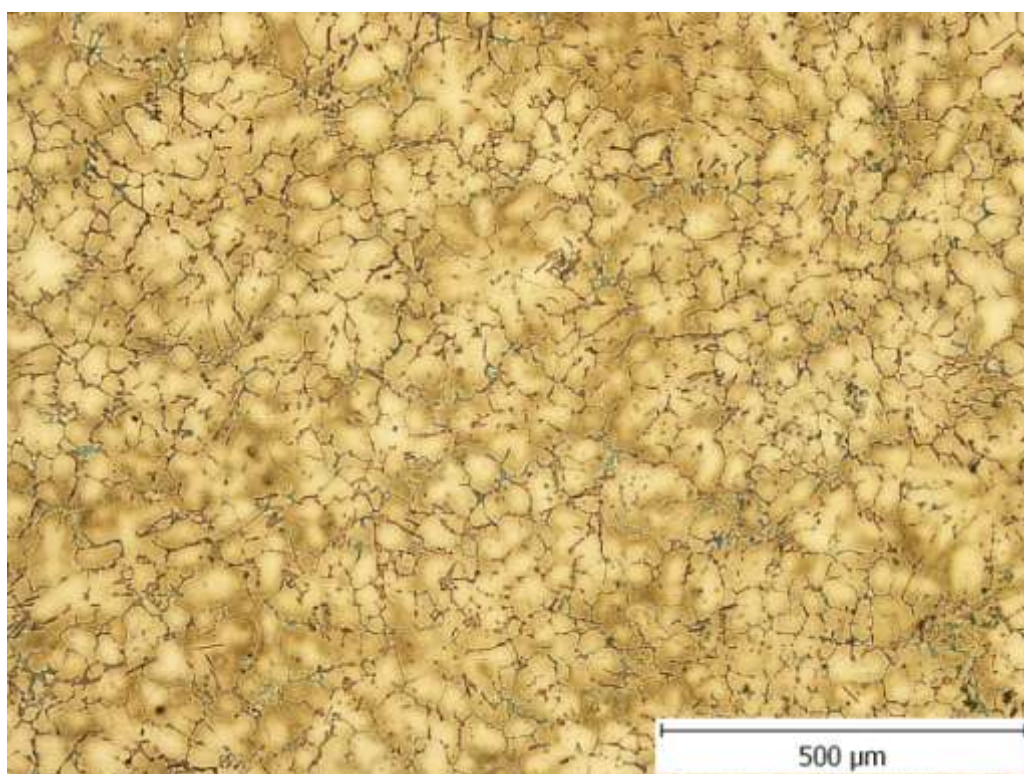


Obrázek 49: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 1000x

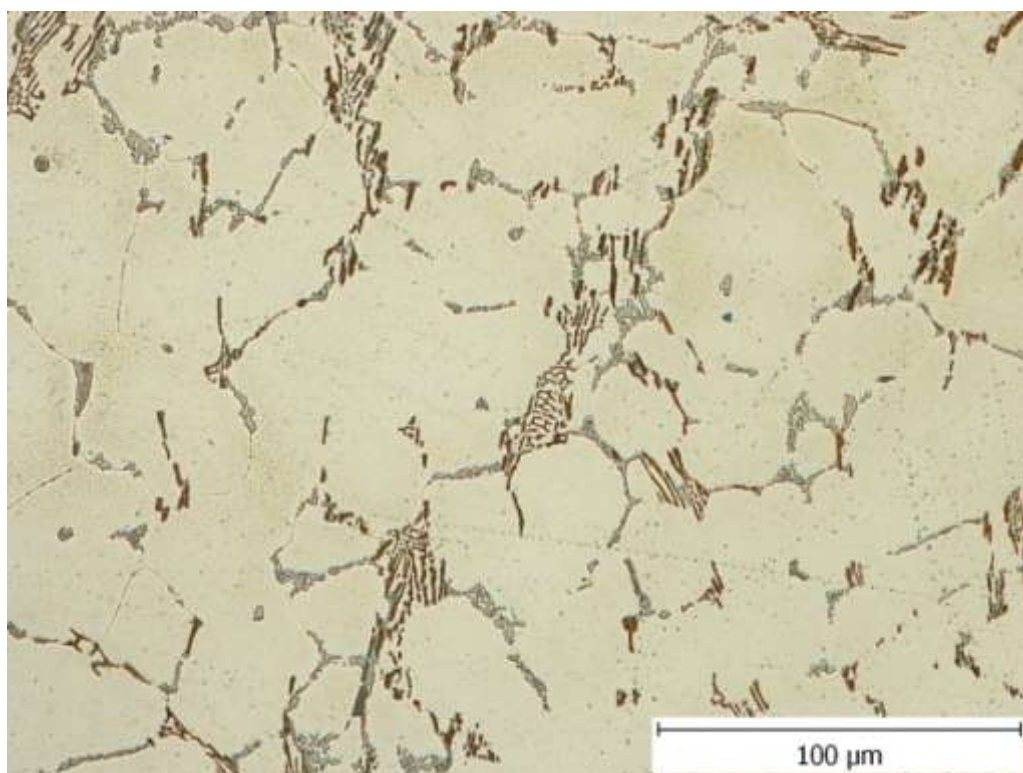
3.4.4.1. Vyhodnocení vzorku č. 101

Na mikrostruktuře (Obr. 47) je vidět opět určitý podíl dutin s větším objemem. Struktura nadále vykazuje zhrubnutí zrna se znaky dendritického odměšování. Dále se u vzorku (Obr. 49) objevují fáze bohaté na antimon a fáze hnědé barvy CuAl_2 , vylučující se po hranicích zrn.

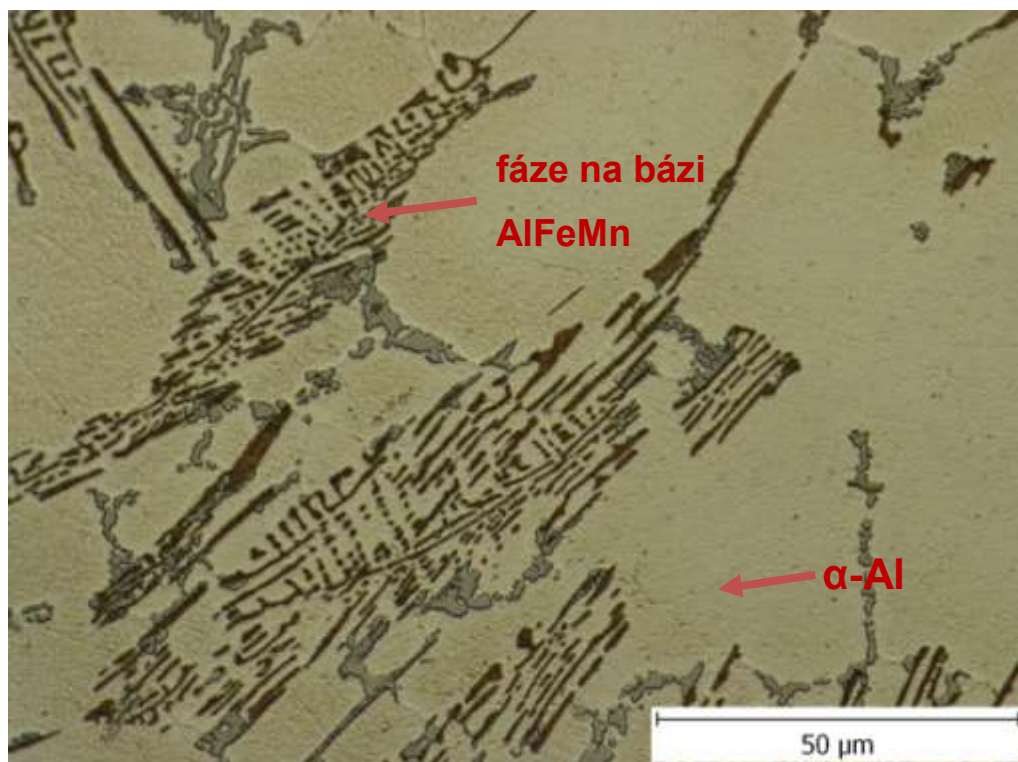
Vzorek č. 104 $T_{\text{liti}} - 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 50: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 100x



Obrázek 51: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 500x

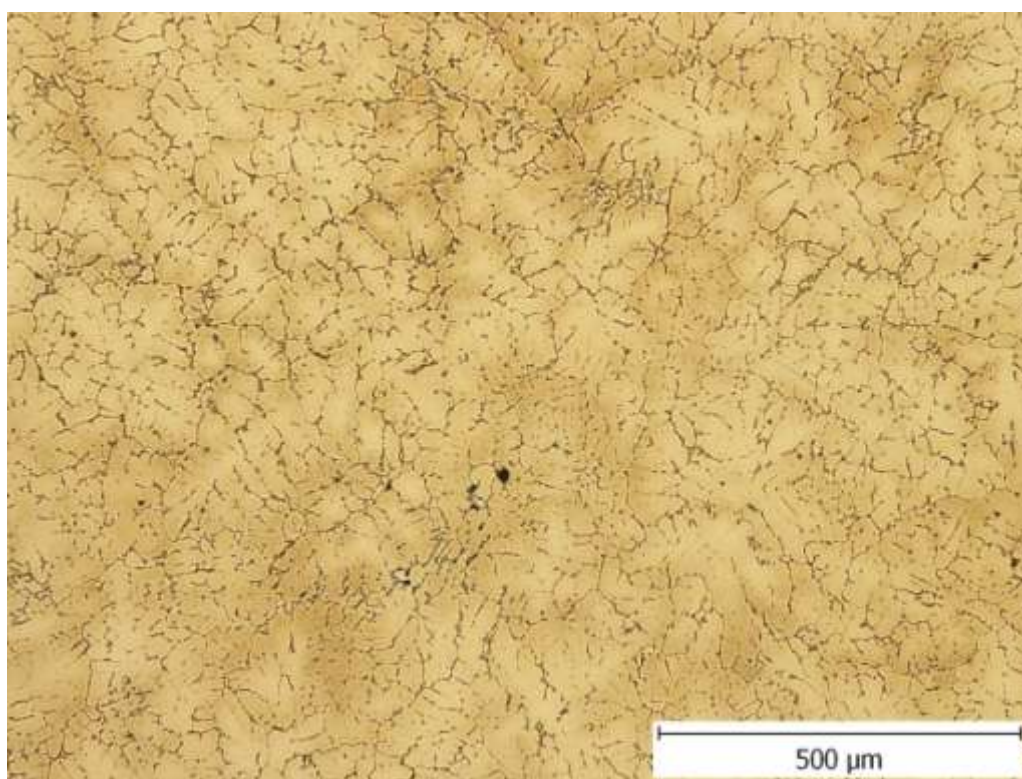


Obrázek 52: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 1000x

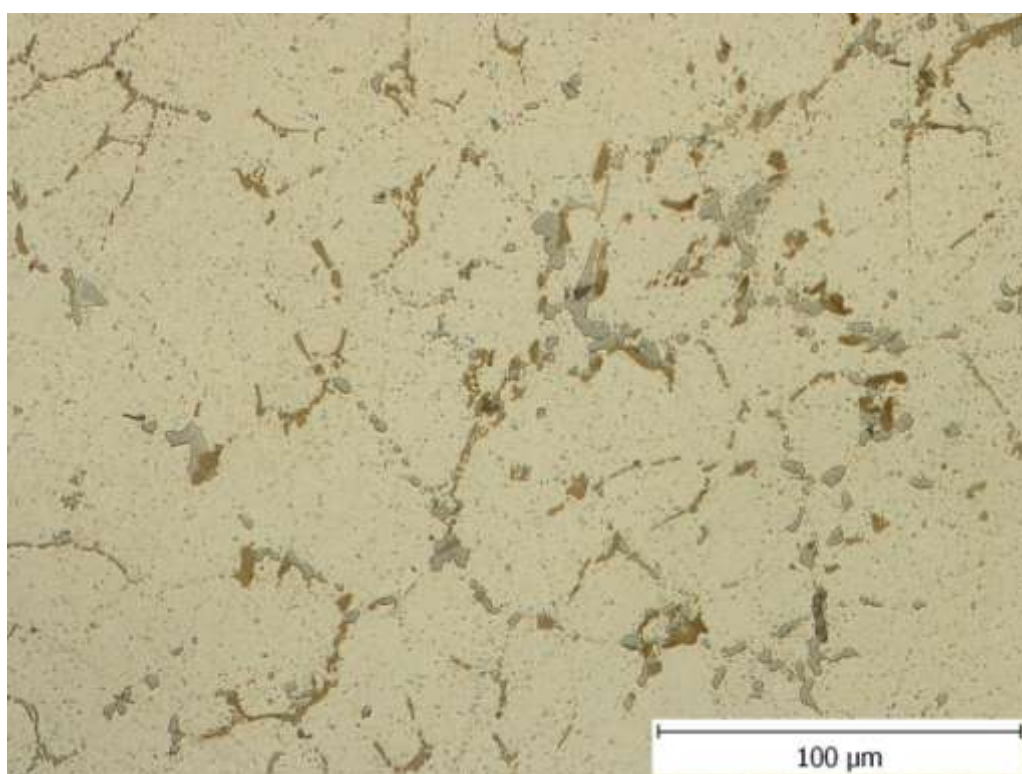
3.4.4.2. Vyhodnocení vzorku č. 104

Vzorek č. 104 (Obr. 50) vykazuje strukturu nestejně zrnitou. Mikrostruktura (Obr. 52) zobrazuje typickou strukturu hrubé rozvětvené intermetalické fáze typu „čínské písmo“. Jedná se o fázi na bázi AlFeMn.

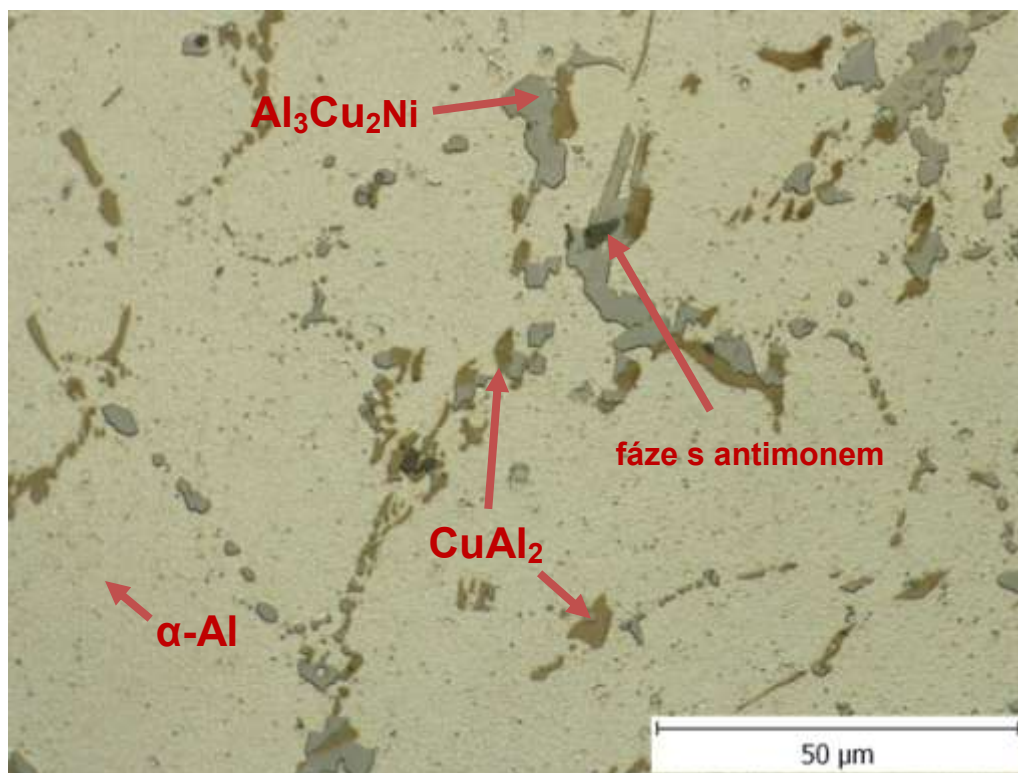
Vzorek č. 112 $T_{\text{liti}} - 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{formy}} - 555\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 53: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 100x



Obrázek 54: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 500x



Obrázek 55: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 1000x

3.4.4.3. Vyhodnocení vzorku č. 112

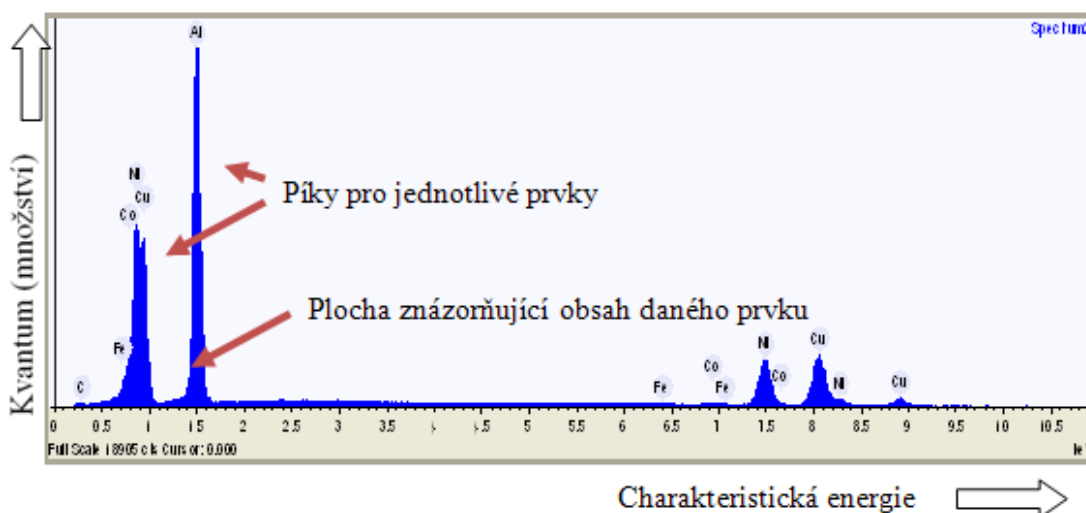
Mikrostruktura vzorku č. 112 vykazuje opět nestejnoměrnou strukturu jako u předešlých vzorků. Na obrázku (Obr. 55) se objevují fáze bohaté na antimon a fáze hnědé barvy CuAl_2 , vylučující se po hranicích zrn. Dále zde vidíme i fázi T- $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Ni}$ šedé barvy.

3.5. ANALÝZA VZORKŮ ELEKTRONOVÝM MIKROSKOPEM

Elektronová mikroskopie je jednou z moderních metod zkoumání struktury materiálů a slouží především k přesné identifikaci chemického složení jednotlivých, nejen intermetalických fází, přítomných ve struktuře.

Tento rastrovací elektronový mikroskop (angl. Scanning Electron Microscope, SEM) se využívá k zobrazování pohyblivý svazek elektronů. Umožňuje mnohem větší zvětšení s velkou hloubkou ostrosti, než je možné u optického mikroskopu. Zdrojem signálu je na rozdíl od světelného vlnění proud elektronů generovaný z katody (žhavené wolframové vlákno), z níž jsou vysokým napětím vytrhávány elektrony a dále soustředěny v tenkém svazku na dané místo. Dopadající svazek vysokým napětím urychlených elektronů (primární elektrony), vlivem jejich velké energie v každém místě dotyku vzorku, vyrazí elektrony z povrchu s různou energií a v různém směru. Tyto svazky elektronů poskytují o vzorku nejdůležitější informace. Jednotlivé typy těchto elektronů jsou sekundární (energie do 50 eV), zpětně odražené (energie od 50 eV do energie primárního elektronu) a Augerovy (energie vyšší než 50 eV, ale menší než primární elektron).[27][28]

Hloubka proniknutí elektronů se liší podle materiálu místa, na který svazek primárních elektronů dopadá. Podle energie odražených elektronů je vykreslen tzv. histogram četností. Tento histogram zobrazuje počet naměřených kvant, která jsou srovnána s počtem kvant pro daný čistý prvek, jehož hodnota musí být vynásobena tzv. ZAF koeficientem (atomové číslo, fluorescence...), jelikož analyzované místo je směs a ne čistá látka (tyto směsi se navzájem ovlivňují). Pod jednotlivým „píkem“ je plocha integrací přepočtena na procenta. Na vodorovné ose histogramu jsou znázorněny energie charakteristické pro jednotlivé prvky.[27][28]



Obrázek 56: Histogram četností

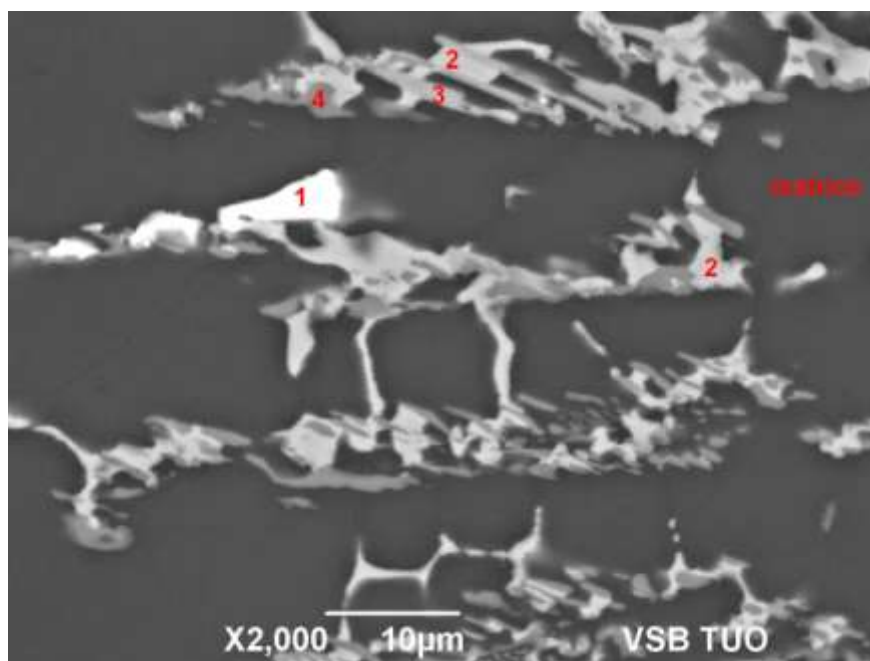
3.5.1. Vyhodnocení analýzy

Snímky v této kapitole byly pořízeny elektronovým mikroskopem JEOL JSM-6490LV na pracovišti Ústavu materiálového inženýrství – VŠB-TU Ostrava.

Vzhledem k velkému počtu vzorků byly vybrány pro analýzu jen střední teploty lití z každé tavby (vzorek č. 31, vzorek č. 42, vzorek č. 82 a vzorek č. 101). Použité vzorky jsou ty, které již byly použity pro metalografické hodnocení.

3.5.1.1. I. TAVBA

Snímek vzorku č. 31



Obrázek 57: Snímek vzorku 31 - zvětšení 2000x

Tabulka 9: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 31

Weight%

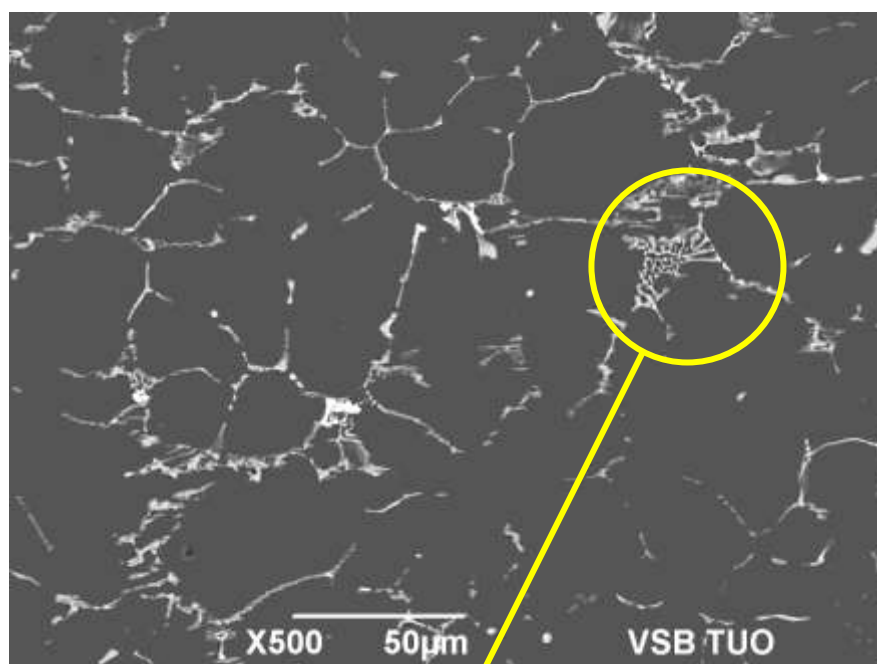
Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Sb
matrice		97,2					2,8		
Spectrum1	15,3	25				0,7	1,7		57,4
Spectrum2		49,8		0,6	1	11	37,6		
Spectrum3		62,8	1,7	2,9	2,7	4,9	24,3	1	
Spectrum4		76,5	0,7	2,7	3,6	12,8	3,7		

Tabulka 10: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 31

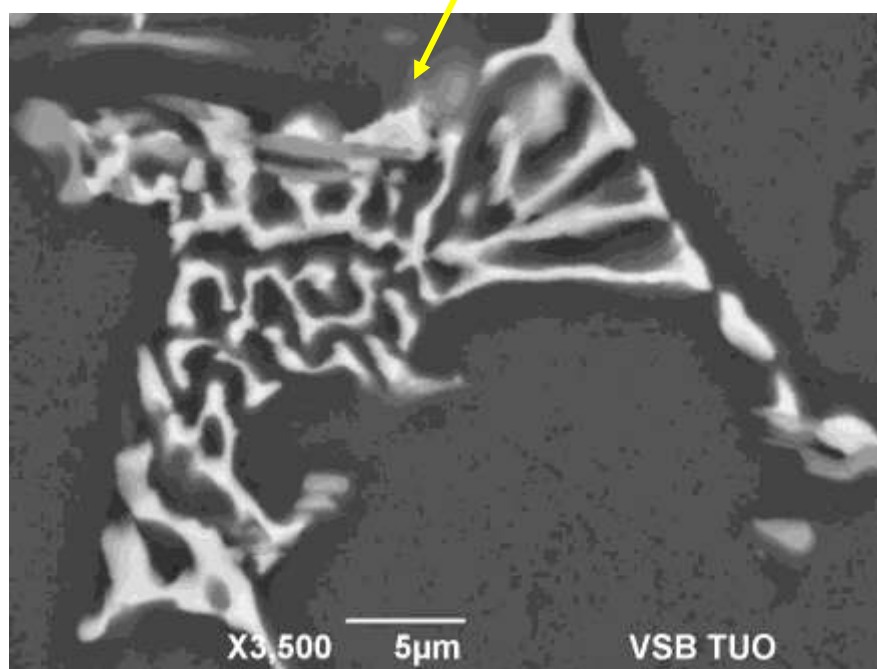
Atomic%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Sb
matrice		98,8					1,2		
Spectrum1	40	38,5				0,5	1,1		19,9
Spectrum2		69,6		0,4	0,6	7,1	22,3		
Spectrum3		79,4	1,1	1,8	1,6	2,8	13,1	0,4	
Spectrum4		87,7	0,4	1,5	1,9	6,8	1,8		

A)



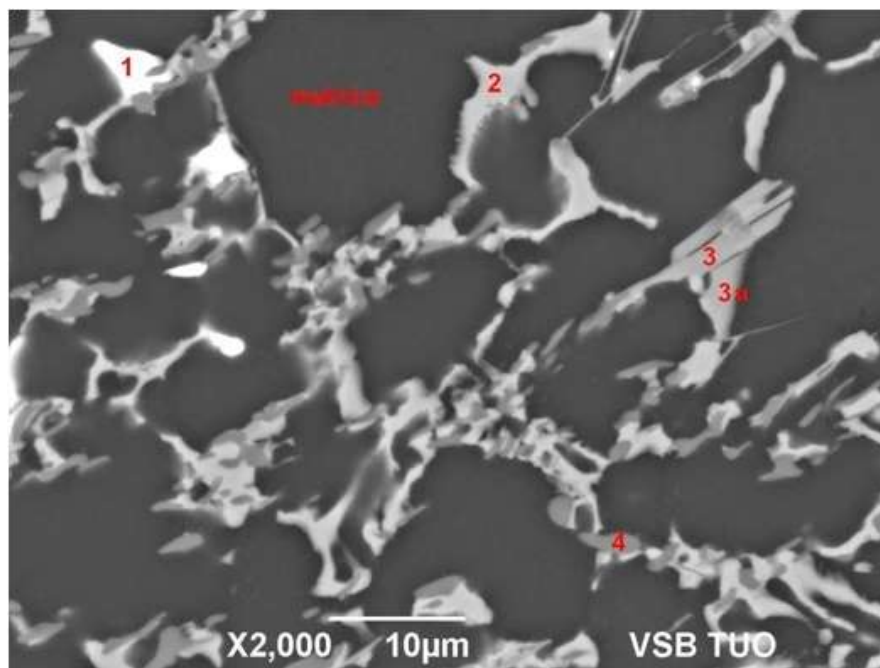
B)



Obrázek 58: Snímky vzorku 31 - zvětšení a) 500x b) 3500x

3.5.1.2. II. TAVBA

Snímek vzorku č.42



Obrázek 59: Snímek vzorku 42 - zvětšení 2000x

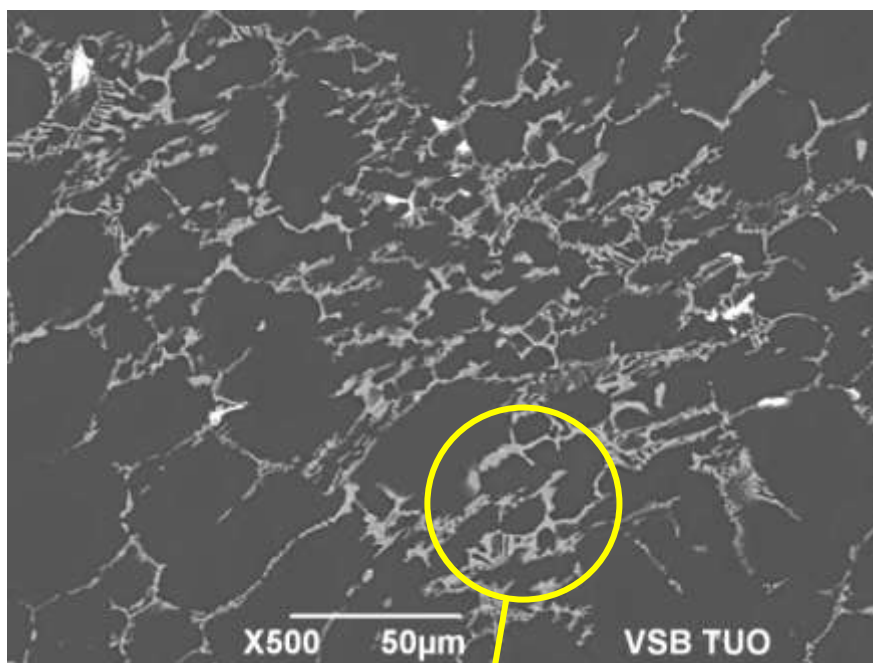
Tabulka 11: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 42

weight%								
Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		97,6					2,4	
Spectrum1	18,2	21,5				1	1,9	57,4
Spectrum2		46		0,3	0,5	15,2	38	
Spectrum3		56,7	3	3,4	2,7	4,6	29,6	
Spectrum3a		53,8				1,2	45	
Spectrum4		70,9	0,7		4,3	15	6,1	

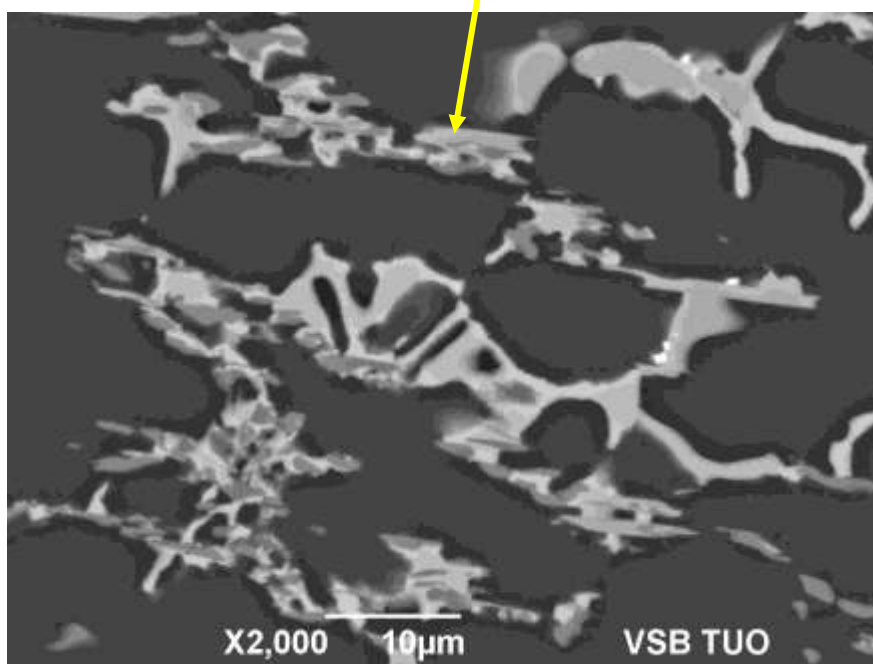
Tabulka 12: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 42

atomic%								
Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		99					1	
Spectrum1	46,4	32,4				0,7	1,2	19,4
Spectrum2		66,2		0,2	0,4	10,1	23,2	
Spectrum3		74,8	1,9	2,2	1,6	2,8	16,7	
Spectrum3a		73,1				0,7	26,1	
Spectrum4		84,2	0,4	1,8	2,3	8,2	3,1	

A)



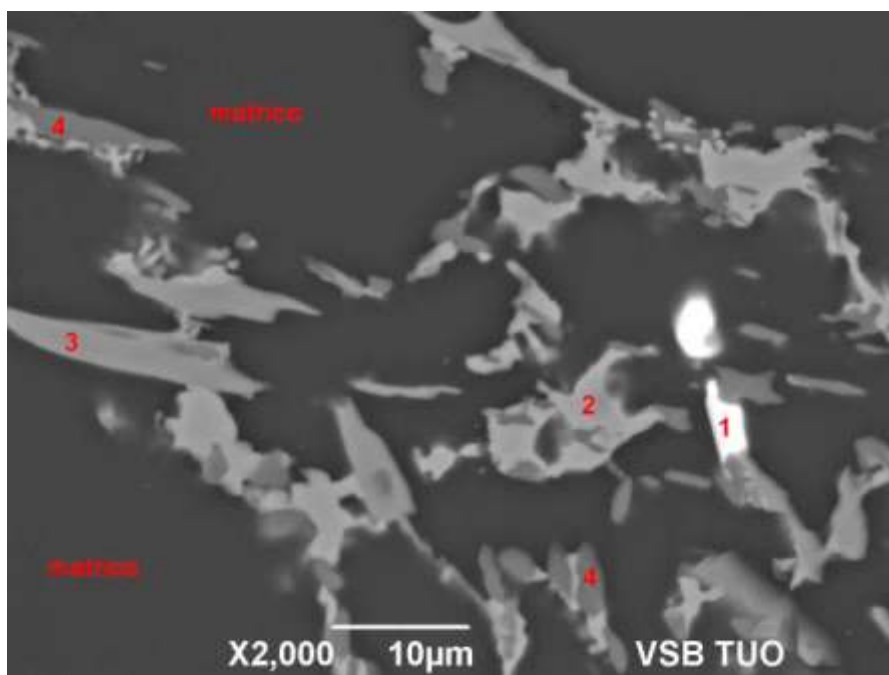
B)



Obrázek 60: Snímky vzorku 42 - zvětšení a) 500x b) 2000x

3.5.1.3. III. TAVBA

Snímek vzorku č. 82



Obrázek 61: Snímek vzorku 82 - zvětšení 2000x

Chemické složení analyzovaných míst 1, 2, 3, 4 a matrice vzorku č. 82

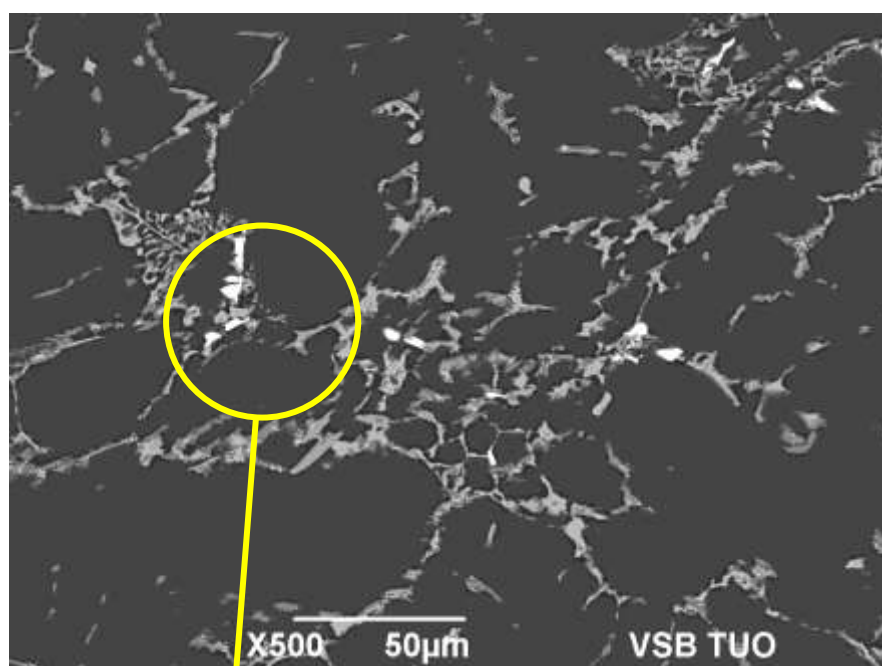
Tabulka 13: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 82

weight%								
Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		96,2					3,8	
Spectrum1	14,6	23,9				0,5	1,2	59,8
Spectrum2		47,2		0,5	0,9	17	34,4	
Spectrum3		54,3	1,9	4,4	3,6	4,8	30,9	
Spectrum4		71,8	0,7	3,7	4,7	14,6	4,4	

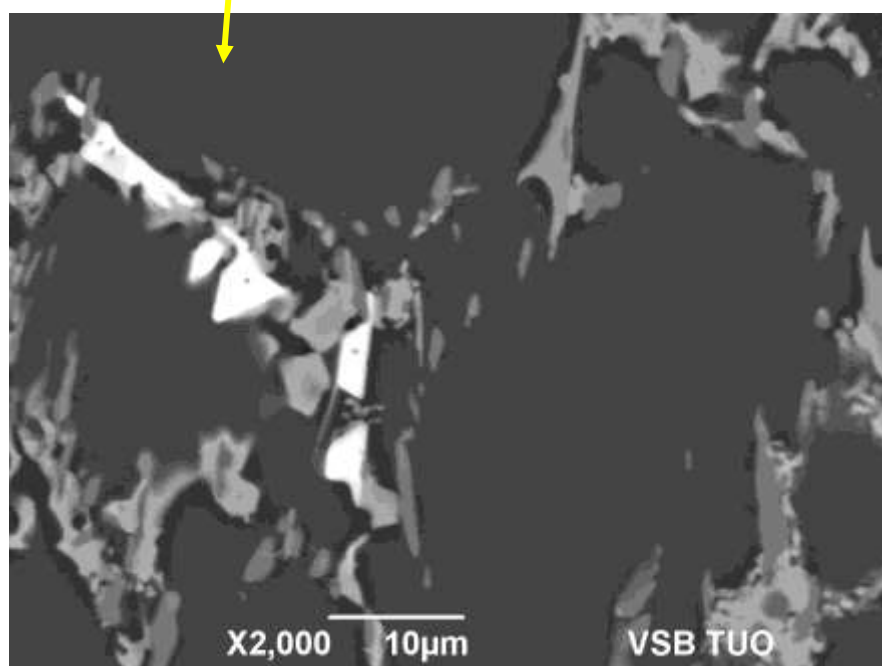
Tabulka 14: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 82

atomic%								
Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		98,3					1,7	
Spectrum1	39,5	37,9				0,4	0,8	21,4
Spectrum2		67,1		0,4	0,6	11,1	20,9	
Spectrum3		73	1,3	2,8	2,2	3	17,7	
Spectrum4		84,8	0,4	2,1	2,5	7,9	2,2	

A)



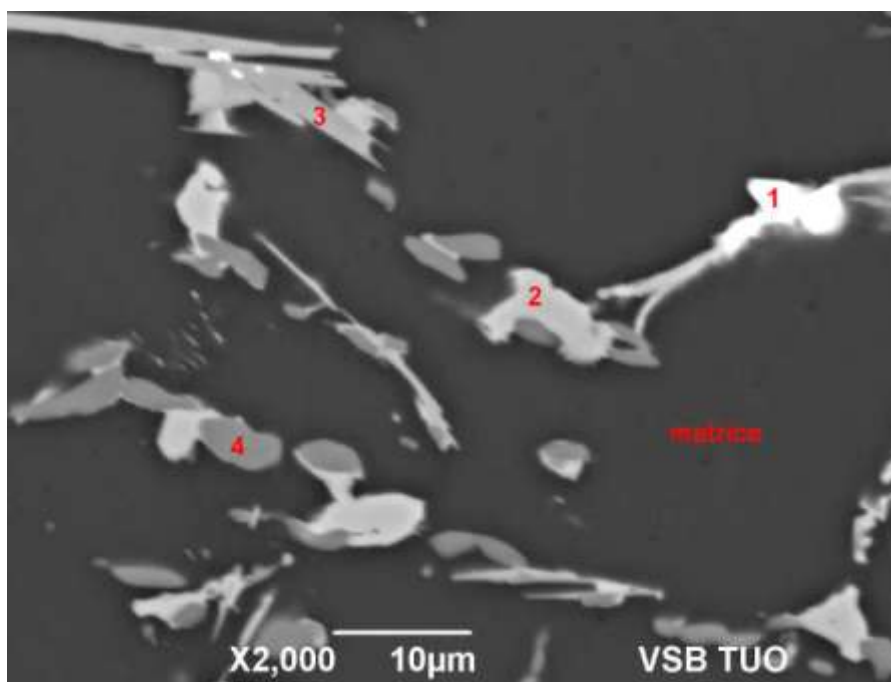
B)



Obrázek 62: Snímky vzorku 82 - zvětšení a) 500x b) 2000x

3.5.1.4. IV. TAVBA

Snímek vzorku č. 101



Obrázek 63: Snímek vzorku 101 - zvětšení 2000x

Chemické složení analyzovaných míst 1, 2, 3, 4 a matrice vzorku č. 101

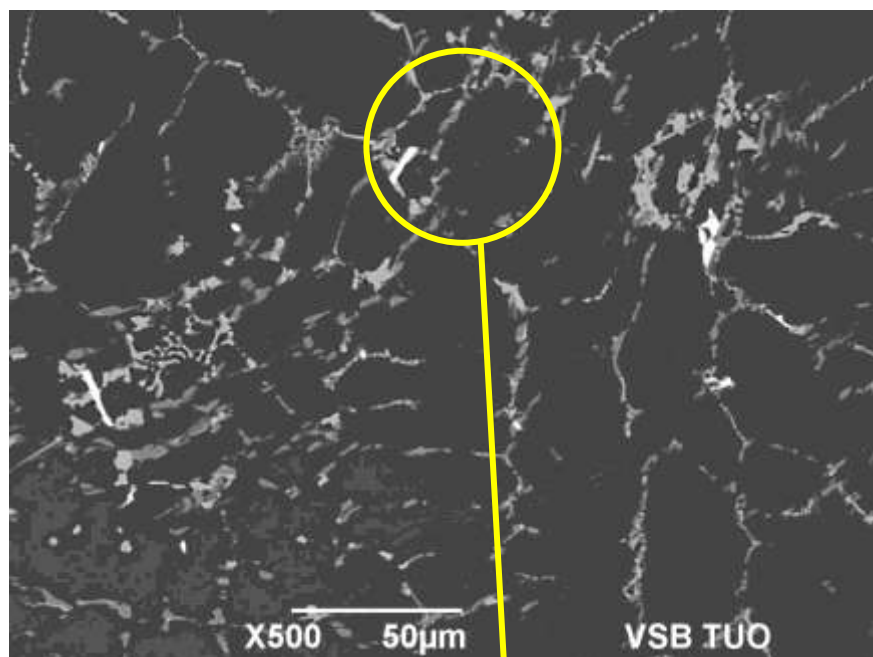
Tabulka 15: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 101

weight%									
Name	O	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		96,9	0,6					2,5	
Spectrum1	16,9	22,8					0,2	1	59,1
Spectrum2		43,7			0,4	0,7	22,5	32,7	
Spectrum3		58,5		2,3	3,9	2,9	4,6	27,7	
Spectrum4		71,1		0,7	4,3	5,3	14,8	3,8	

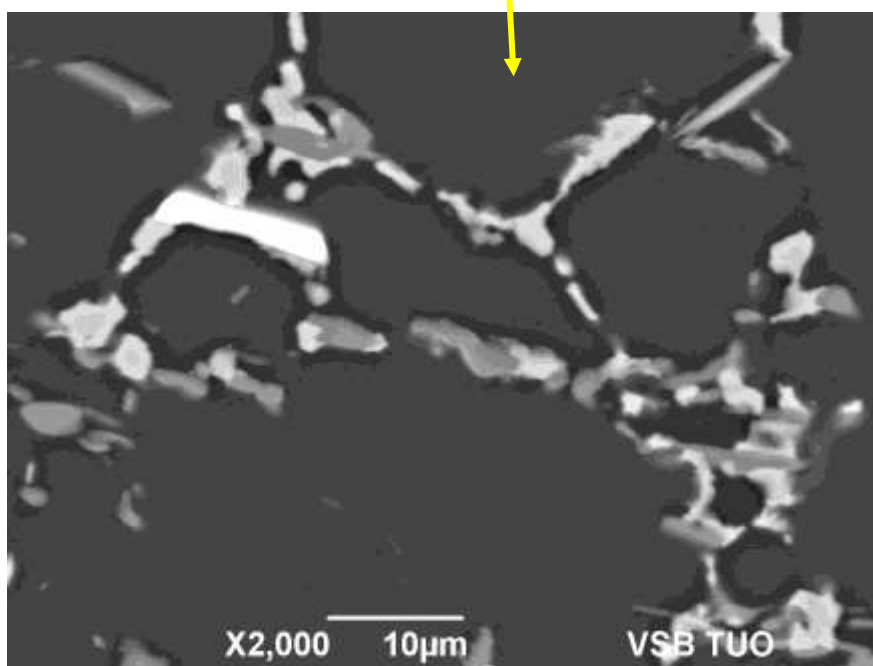
Tabulka 16: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 101

atomic%									
Name	O	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		98,6	0,4					1	
Spectrum1	44,1	34,4					0,1	0,7	20,7
Spectrum2		63,8			0,3	0,5	15,1	20,3	
Spectrum3		76,2		1,5	2,4	1,7	2,8	15,4	
Spectrum4		84,3		0,4	2,5	2,9	8,1	1,9	

A)



B)



Obrázek 64: Snímky vzorku 101 - zvětšení a) 500x b) 2000x

3.6. POPIS STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

3.6.1. Tahová zkouška

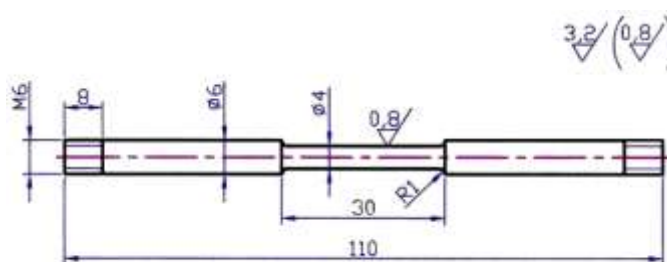
Tahová zkouška se uvádí jako nejdůležitější u zkoušení mechanických vlastností. Z výsledného sestaveného tahového diagramu se určují mechanické vlastnosti jako R_e – mez kluzu, R_m – mez pevnosti, A – tažnost, Z – kontrakce

Tento sestavený tahový diagram nám určuje závislost síly F na poměrném prodloužení ΔL , nebo po přepočtu u jednoosého tahu σ - ϵ .

Zkušební část odlitku byla opracována na patřičný rozměr na soustruhu. Trhací vzorky měly rozměr: 110mm, D 6mm, d 4mm. Na koncových částech pak byly vysoustruženy metrické závity M 6, aby se vzorek mohl upnout do vložek a následně zafixovat do trhacího stroje (Obr. 66, 67). Samotná tahová zkouška byla prováděna na trhacím stroji značky INOVA (Obr. 65) v laboratořích VŠB-TU Ostrava. Tato zkouška nejprve proběhla při pokojové teplotě (20 – 23°C), dále pak za zvýšených teplot a to při 100, 150, 200, 250 a 300°C. Aby se docílilo stejné teploty v celém průřezu a délce zkušebního tělesa, byla definována výdrž alespoň na 5min. Následná tahová zkouška pak končí docílením přetržení zkušební tyče. Výsledné hodnoty tahové zkoušky byly pomocí čidel přenesunuty do počítače, kde se zaznamenala závislost pevnosti [MPa], plasticity [%] a lomové práce [J] na teplotě [°C].



Obrázek 67: Trhací stroj značky INOVA



Obrázek 66: Vzorek pro tahovou zkoušku



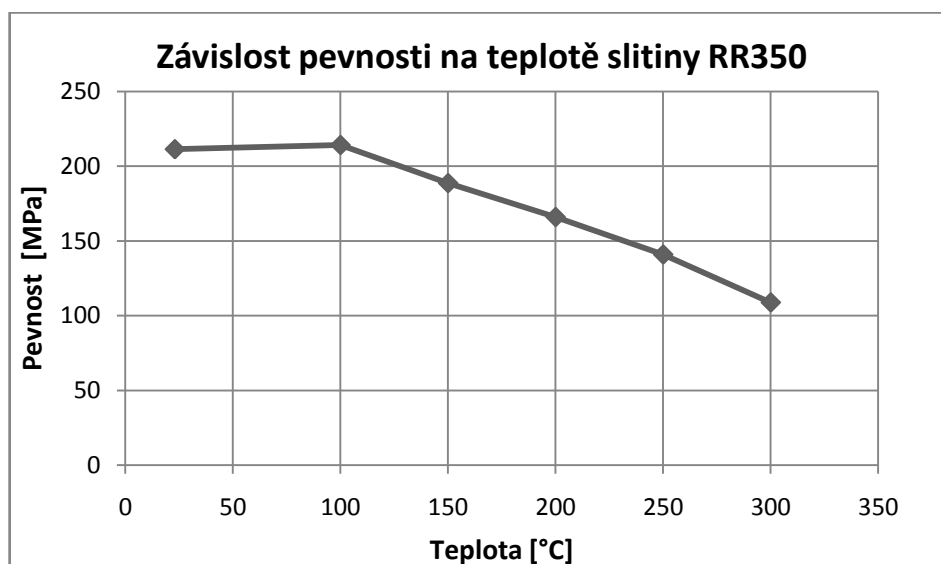
Obrázek 65: Vzorek s vložkami pro tahovou zkoušku[26]

3.6.2. Rozbor a zhodnocení naměřených výsledků

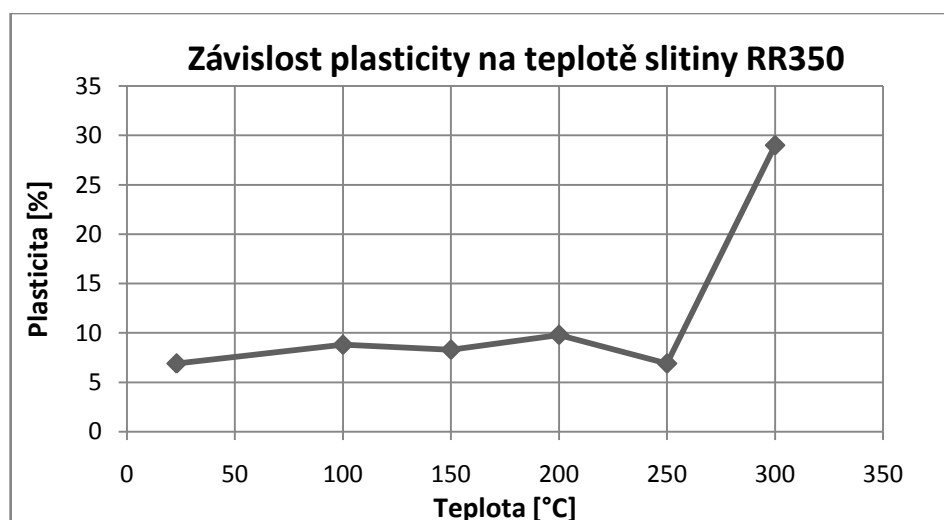
3.6.2.1. I. Tavba

Tabulka 17: Výsledky tahové zkoušky I. tavby

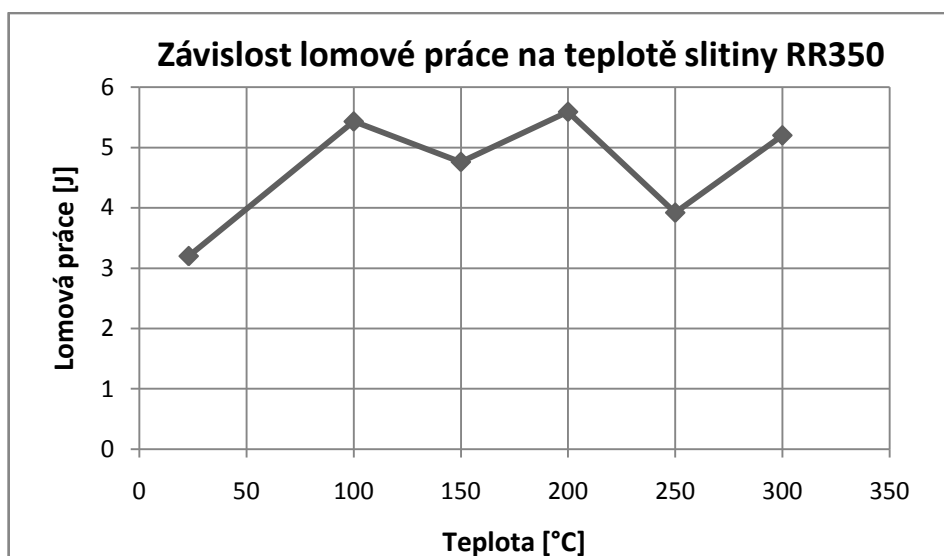
Zkušební teplota [°C]	Pevnost [MPa]	Plasticita [%]	Lomová práce [J]
23	211	6,9	3,2
100	214	8,8	5,43
150	189	8,3	4,76
200	166	9,8	5,59
250	141	6,9	3,92
300	109	29	5,2



Graf 1: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350



Graf 2: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350



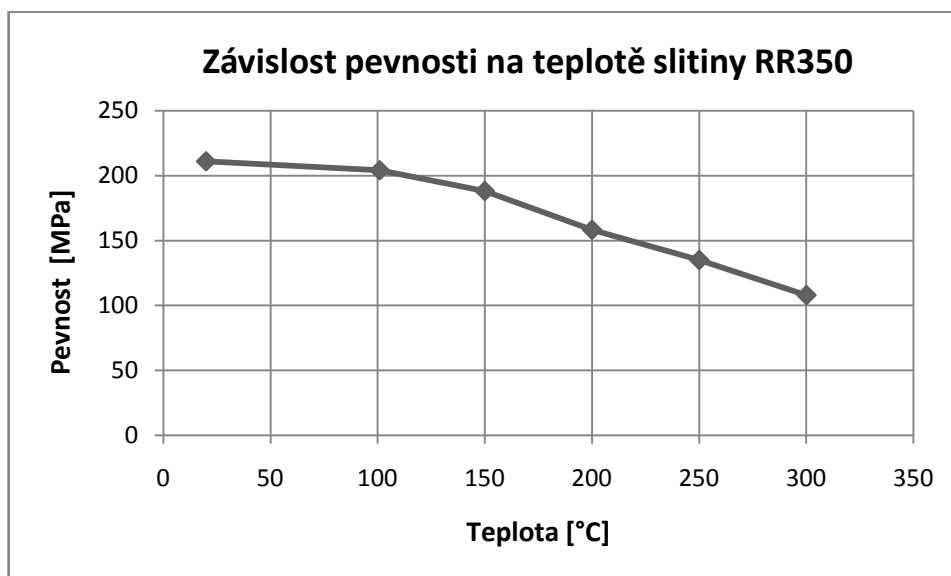
Graf 3: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350

Pevnost v tahu I. tavby (Graf 1) při teplotě 23 °C vykazuje hodnotu 211 MPa, u další teploty 100°C pak pevnosti narůstají na 214 MPa. U dalších teplot vidíme, jak pevnosti strmě klesají. Plastické vlastnosti (Graf 2) vykazují mírné zvýšení na teplotě 100°C, následuje pokles do teploty 200°C a od 250°C má slitina rapidní nárůst plasticity.

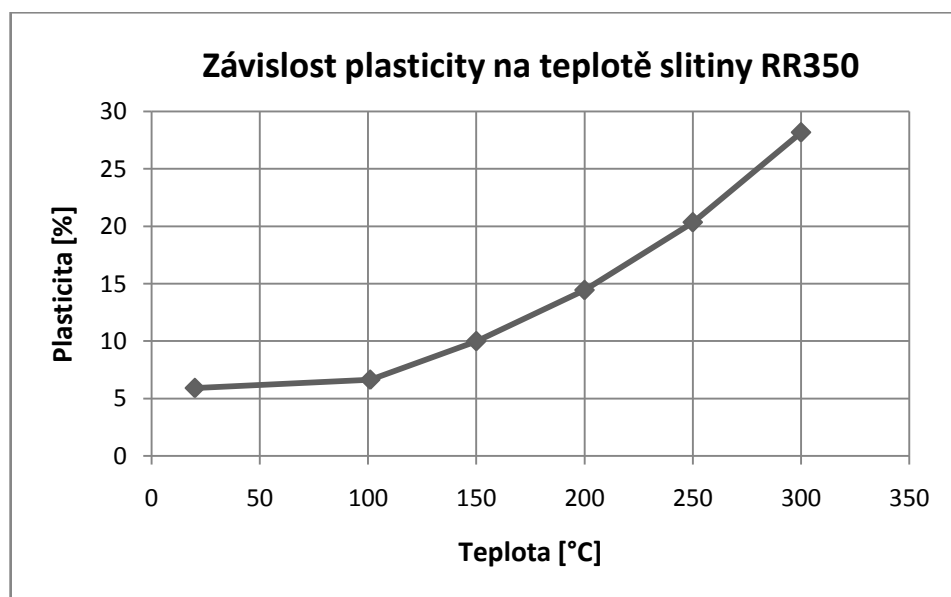
3.6.2.2. II Tavba

Tabulka 18: Výsledky tahové zkoušky II. tavby

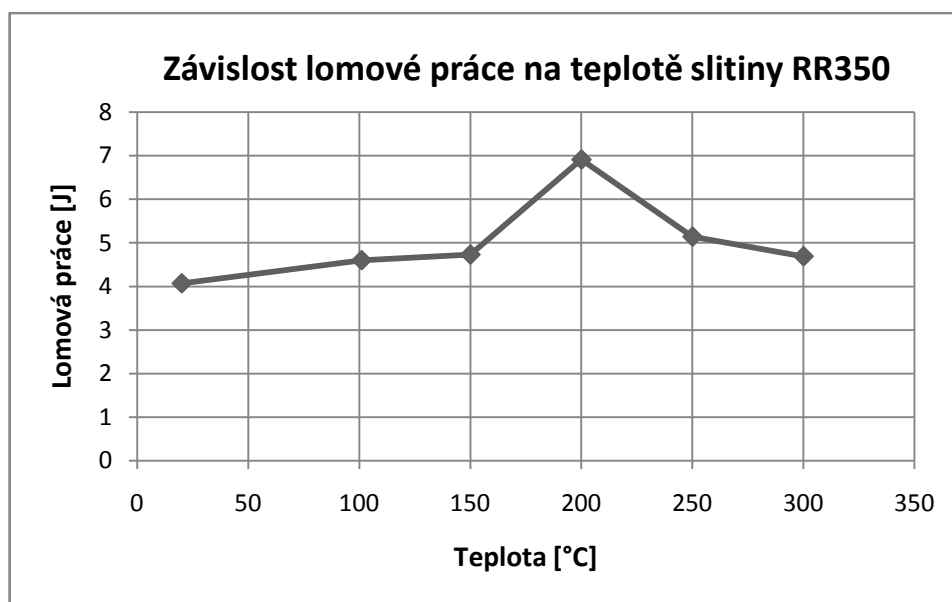
Zkušební teplota [°C]	Pevnost [MPa]	Plasticita [%]	Lomová práce [J]
20	211	5,91	4,07
101	204	6,63	4,6
150	188	9,99	4,73
200	158	14,44	6,91
250	135	20,34	5,14
300	108	28,17	4,69



Graf 4: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350



Graf 5: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350



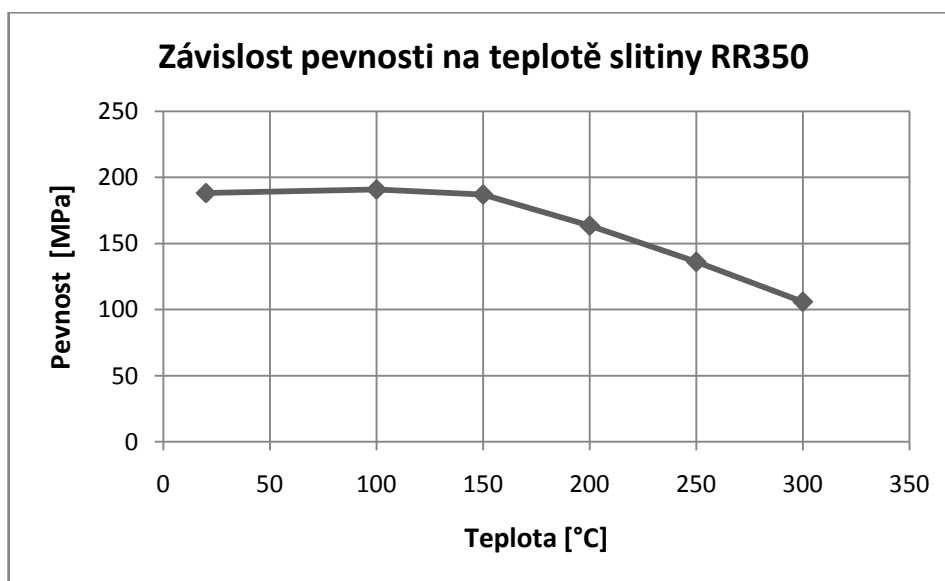
Graf 6: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350

Závislost pevnosti v tahu na teplotě II. tavby (Graf 4) při teplotě 20 °C vykazuje stejnou hodnotu jak u předchozí tavby 211 MPa, ale na další teplotě 101°C pak pevnosti mírně klesají na 204 MPa. U dalších teplot 150, 200, 250, 300°C vidíme již zřetelný pokles pevnosti v tahu. Plasticité vlastnosti (Graf 5) vykazují mírné zvýšení na teplotě 101°C, poté od teploty 101°C je již nárůst plasticity mnohem výraznější.

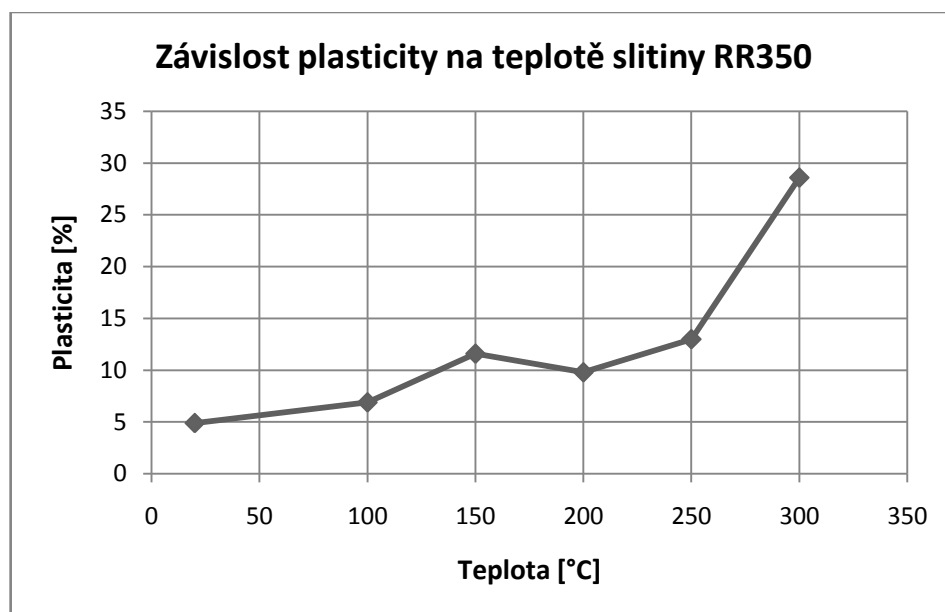
3.6.2.3. III Tavba

Tabulka 19: Výsledky tahové zkoušky III. tavby

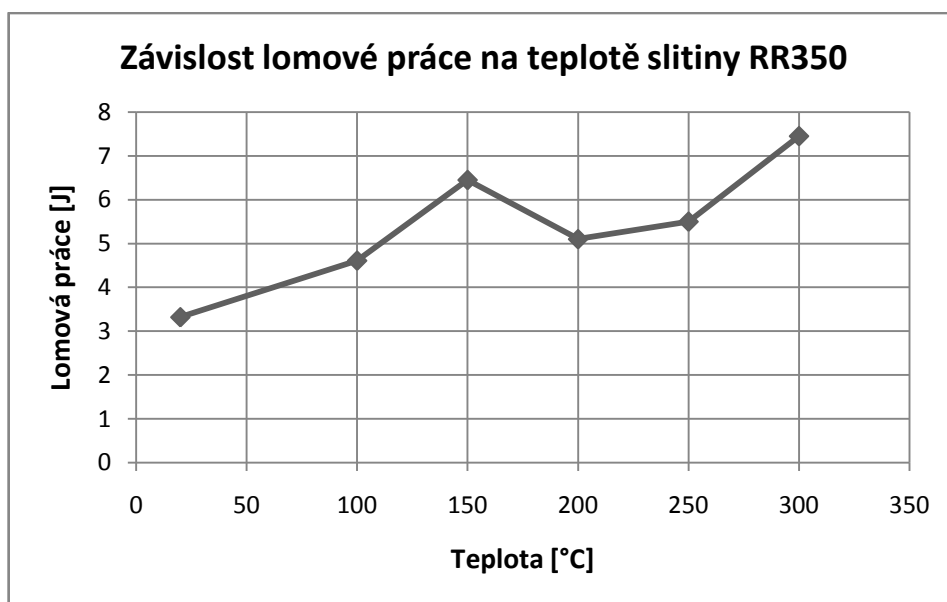
Zkušební teplota [°C]	Pevnost [MPa]	Plasticita [%]	Lomová práce [J]
20	188	4,9	3,32
100	191	6,9	4,61
150	187	11,6	6,45
200	164	9,8	5,1
250	136	13	5,5
300	106	28,6	7,45



Graf 7: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350



Graf 8: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350



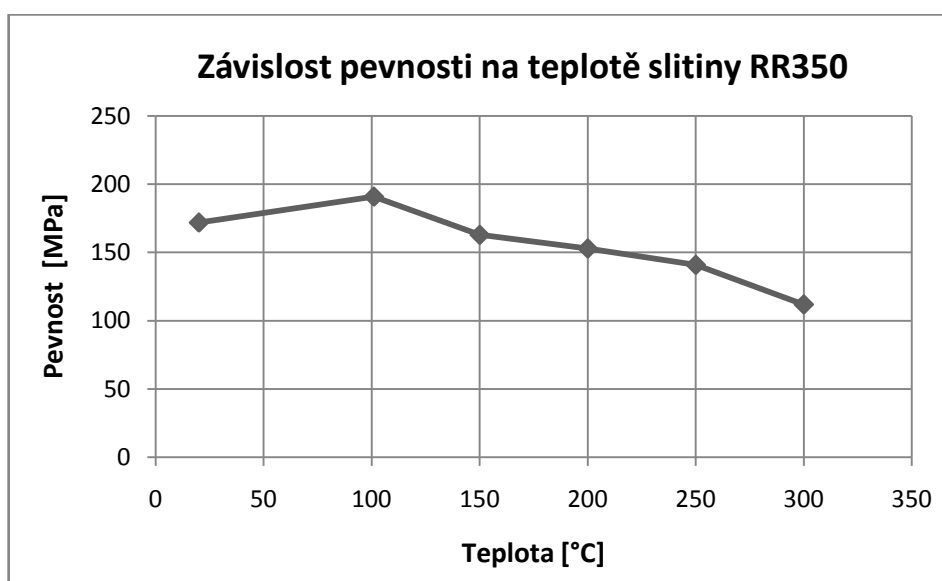
Graf 9: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350

U III. tavby vidíme, že pevnostní vlastnosti (Graf 7) narůstají od teploty 20°C, kde byla naměřena pevnost 188MPa, až do teploty 100°C, která vykazovala pevnost 191MPa. Od těchto teplot následně nastává mírný pokles hodnot na 187MPa při teplotě 150°C. Poté je již pokles pevnosti v tahu zřetelnější. Plastické vlastnosti (Graf 8) narůstají od 20°C do 150°C, následuje mírný pokles do teploty 200°C. Od této teploty začínají hodnoty mírně stoupat a při 250°C je již nárůst velmi výrazný.

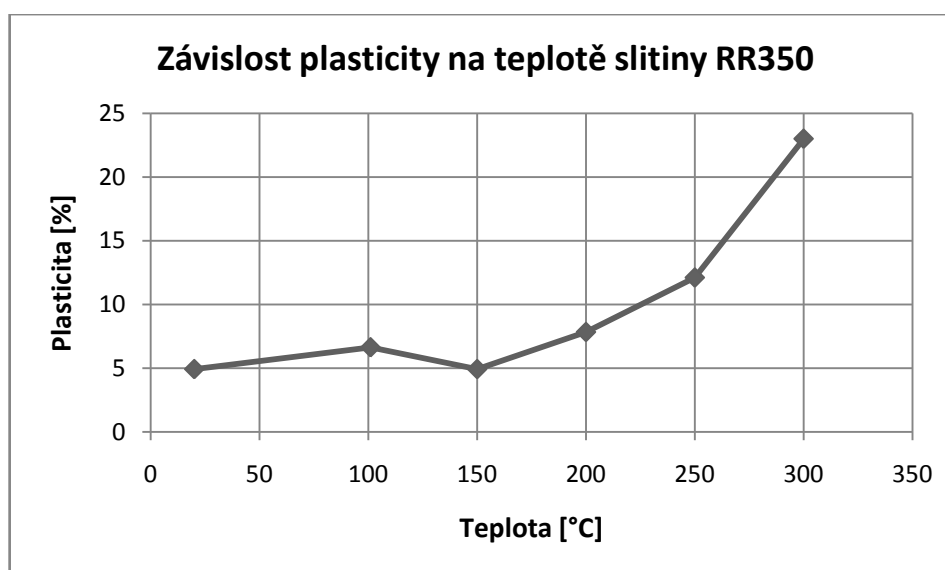
3.6.2.4. IV Tavba

Tabulka 20: Výsledky tahové zkoušky IV. tavby

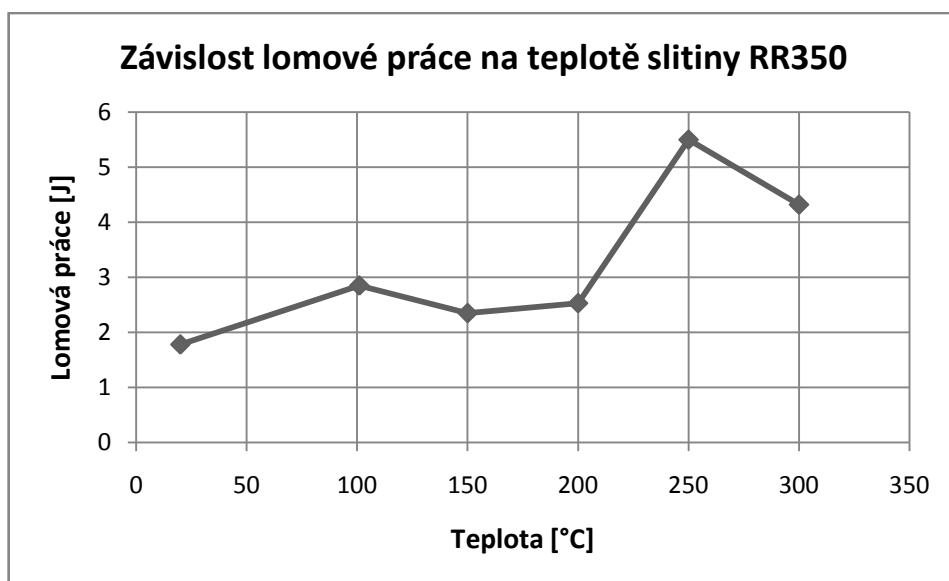
Zkušební teplota [°C]	Pevnost [MPa]	Plasticita [%]	Lomová práce [J]
20	172	4,93	1,78
101	182	6,64	2,85
150	163	4,93	2,35
200	153	7,84	2,53
250	141	12,11	5,5
300	112	23	4,32



Graf 10: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350



Graf 11: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350

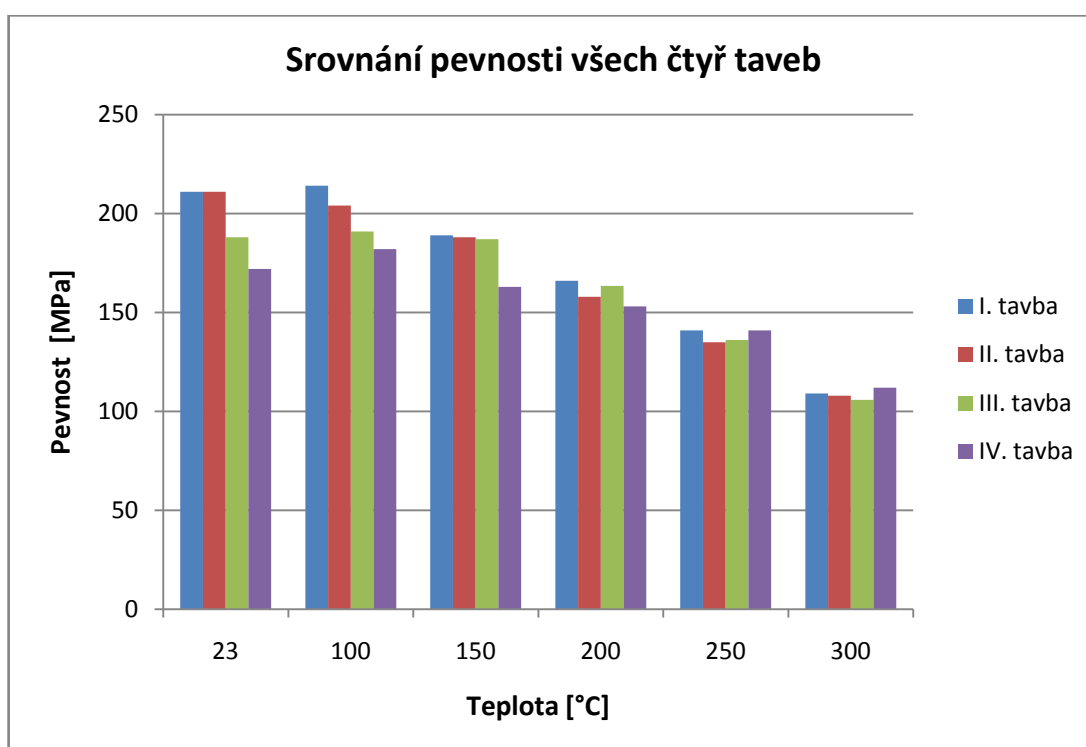


Graf 12: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350

Pevnost v tahu IV. tavby (Graf 10) na teplotě 20°C vykazuje hodnotu 172 MPa nadále pak při teplotě 101°C pevnost mírně stoupla na hodnotu 182 MPa. V dalším průběhu křivky teplot 150, 200, 250, 300°C vidíme již zřetelný pokles pevností a to od 163MPa do 112MPa. U závislosti plasticity na teplotě (Graf 11) vidíme, že do 101°C plasticita roste, od této hodnoty je zřetelný pokles této závislosti. Nadále pak od teploty 150°C je výrazný nárůst naměřených hodnot.

Srovnání pevnosti všech čtyř taveb

Zkušební teplota [°C]	Pevnost [MPa]			
	I. Tavba	II. Tavba	III. Tavba	IV. Tavba
20	211	211	188	172
101	214	204	191	182
150	189	188	187	163
200	166	158	164	153
250	141	135	136	141
300	109	108	106	112



Graf 13: Srovnání pevnosti všech čtyř taveb

Srovnáním všech čtyř taveb vidíme, že při teplotě 20°C se u prvních dvou taveb nemění pevnost, u třetí tavby však pevnost klesla o 11% a u čtvrté tavby o 18%.

Při teplotě 101°C druhá tavba v porovnání s první tavbou klesla v pevnosti o 5%, dále pak pevnost u třetí a čtvrté tavby klesala o 11% a 15%.

U teploty 150°C se hodnoty pevnosti prvních tří taveb příliš nemění, u čtvrté tavby se pevnosti snížily o 14%.

Teploty 200°C, 250°C a 300°C zobrazují téměř stejné hodnoty pevnosti u všech čtyř taveb.

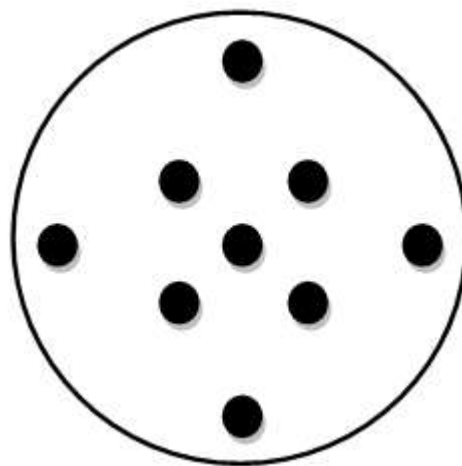
3.6.3. Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti dle Brinella byla prováděna na tvrdoměru WPM v laboratořích VŠB-TU Ostrava (Obr. 67). Vzorky pro tuto zkoušku byly z koncové části zkušební tyče odlitku, tak jako na metalografické zhodnocení. Jako zkoušecí těleso byla použita kalená ocelová kulička o průměru 2,5 mm. Pomocí manipulačního kola se přizvedla pracovní podložka, na které byl zkoušející vzorek tak, aby bylo vidět v okuláru ostře kovovou matici zkušební vzorku. Zatížení pro tuto operaci bylo 31,25kg, tzn. 306,5 N při výdrži na tomto zatížení 10s.

Následující průměr otisku kuličky byl naměřen pomocí pohyblivé stupnice v otočném okuláru. Pro přesnější výsledky se na každém vzorku provedlo celkem devět vpichů z důvodu eliminace vad ve struktuře a při měření (Obr. 68). Tyto hodnoty pak byly zprůměrovány.



Obrázek 68: Tvrdoměr WPM

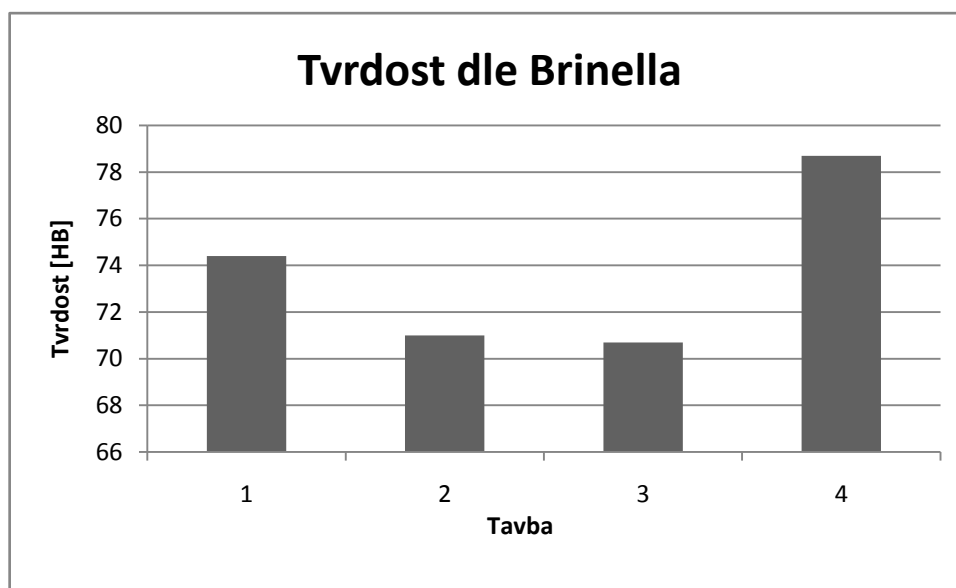


Obrázek 69: Rozložení vpichů

3.6.3.1. Rozbor a zhodnocení naměřených výsledků

Tabulka 21: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Brinella

Tavba	Vzorek číslo:	Tvrdost [HB]	Průměrná hodnota [HB]
1	14	72	74,4
	28	80	
	31	72	
2	40	68	71
	42	72	
	52	73	
3	82	76	70,7
	84	68	
	90	68	
4	101	79	78,7
	104	77	
	112	80	



Obrázek 70: Graf naměřených hodnot tvrdosti dle Brinella

V prvních třech tavbách tvrdost slitiny klesá od 74,4 do 70,7 HB. Ale vidíme, že ve čtvrté tavbě tvrdost slitiny stoupla až na 78,7 HB. Detailní průzkum mikrostruktury vzorků ukazuje, že tento jev může být způsoben shlukováním tvrdých intermetalických fází a větším množstvím vytvořené fáze AlFeMn .



4. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zpracována na téma „Vliv opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu a mechanické vlastnosti odlitku“. V teoretické části byly shrnuty vlastnosti hliníku a jeho slitin. Dále pak popsány vlastnosti slitiny RR350 (AlCu5NiCoSbZr) a následně rozebrán stručný souhrn vybraných binárních a ternárních diagramů, prvků obsažených v této slitině. Na závěr teoretické části byly objasněny mechanické vlastnosti slitin hliníku a rozebrány dvě zkoušky: zkouška v tahu a zkouška tvrdosti dle Brinella.

V experimentální části byly aplikovány poznatky z části teoretické a pomocí metalografických výbrusů byl zkoumán vliv opakovaného použití hliníkových slitin na strukturu odlitku. Byly zde zaznamenány čtyři různé fáze a matrice vylučující se ve slitině. Podle získaných výsledků z metalografických výbrusů bylo zjištěno, že morfologie struktury je ovlivněna vícenásobným přetavováním a vyšší teplotou při lití. Změny ve struktuře můžeme klasifikovat jako zhrubnutí zrna, nestejnomyšernost dendritických buněk, vyšší obsah dutin a zvýšenou segregaci prvků.

Mikrostruktura vzorků z první tavby byla tvořena stejnoměrnou dendritickou strukturou. Dále vykazovala slitina fáze hnědé barvy CuAl_2 , vylučující se po hranicích zrn. Byla zaznamenána i fáze šedé barvy, bohatá především na nikl a měď. Jedná se o fázi, která zvyšuje žárovečnost dané slitiny, tzv. fáze T - $\text{Al}_3\text{Cu}_2\text{Ni}$. Dále se u slitiny objevila fáze tmavě hnědé barvy s větším podílem kobaltu, mědi, niklu a železa. Je zde patrná i fáze s vysokým obsahem antimonu hnědočerné až černé barvy.

Vzorky získané z druhé tavby, vykazovaly nestejnomyšernou strukturu tvořenou dendrity s větším množstvím mikrostaženin. Dále zde byl patrný úbytek fází s niklem, mědí a kobaltem. Objevila se zde i intermetalická fáze typu AlFeMn.

U vzorků z třetí tavby byl zaznamenán zřetelně větší obsah dutin a mikropórovitosti, neboť se jednalo o slitinu, která je na tyto vady náchylná. Struktura slitiny byla opět nestejnomyšerná. Jednalo se o shluky dendritických buněk a vyšší mikrosegregaci. Byl zřejmý také úbytek jak fází bohatých na nikl, tak i fází s větším obsahem mědi a kobaltu.

Metalografické výbrusy vzorků následné čtvrté tavby, vykazovaly zřetelný podíl dutin s větším objemem. Mikrostruktura obsahovala větší množství hrubé rozvětvené intermetalické fáze typu AlFeMn.



Byl zkoumán také vliv opakovaného použití hliníkových slitin na mechanické vlastnosti odlitku a to zkouškou v tahu a zkouškou tvrdosti dle Brinella.

Dle zkoušky v tahu bylo zjištěno, že přetavováním slitiny RR350 a následným srovnáním všech čtyř taveb se při teplotě 20°C u prvních dvou taveb nemění pevnost, u třetí tavby však pevnost klesla o 11% a u čtvrté tavby o 18%. Při teplotě 101°C druhá tavba v porovnání s první tavnou klesla v pevnosti o 5%, dále pak pevnost u třetí a čtvrté tavby klesala o 11% a 15%. U teploty 150°C se hodnoty pevnosti prvních tří taveb příliš nemění, u čtvrté tavby se pevnosti snížily o 14%. Teploty 200°C, 250°C a 300°C zobrazily téměř stejné hodnoty pevnosti u všech čtyř taveb.

Pomocí zkoušky tvrdosti dle Brinella se prokázalo, že v prvních třech tavnách tvrdost slitiny klesá od 74,4 do 70,7 HB. Po provedení čtvrté tavby však tvrdost slitiny opět stoupla až na 78,7 HB. Detailní průzkum mikrostruktury vzorků ukazuje, že tento jev může být způsoben shlukováním tvrdých intermetalických fází a větším množstvím vytvořené fáze AlFeMn.



5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] ŠPERLINK, K.: *Budoucnost užití Al a Al slitin*. In.: Aluminium 2003, Děčín 2003
- [3] Hydro Aluminium, Automovie – Partner der Automobilindustrie. Aluminium, 2003
- [4] BOLIBRUCHOVÁ, D.; BRŮNA, M.; SLÁDEK, A.: *Vplyv pretavovania na vlastnosti zliatiny AlSi7Mg0,3 modifikovanej stronciom*. Transactions of the Universities of Košice. 4/2009, s. 9-16, ISSN 1335-2334.
- [5] ROUČKA, Jaromír.: *Metalurgie neželezných slitin*. S.r.o. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 147 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [6] BOLIBRUCHOVÁ, D.; TILLOVÁ, E.: *Zlievarenské zliatiny Al-Si*. ŽU v Žilině, 2005. ISBN 80-8070-485-6.
- [7] KOŘENÝ, R.: *Slévárenství neželezných kovů a slitin*. I. vydání. Ostrava, 1971. 271 s.
- [8] GRÍGEROVÁ, T. – KOŘENÝ, R. – LUKÁČ, I.: *Zlievarenstvo neželezných kovo*. 1.vyd., ALFA Bratislava, 1988
- [9] VARGEL, Christian. *Corrosion of Aluminium*. Paris: Dunod, 2004. 615 s.
Dostupné z WWW:
<http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2181>. ISBN 0080444954
- [10] [Http://aluminium.matter.org.uk](http://aluminium.matter.org.uk) [online]. c2001 [cit. 2011-01-12]. AluMATTER.
Dostupné z WWW:
<<http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=214&pageid=2144417081>>.
- [11] BÄCKERUD, L.; CHAI, G.; TAMINEN, J.: *Solidification Characteristic of Aluminium Alloys*. Foundry Alloys. Volume 2 . ASF Skanaluminium, Stockholm, 1990.
- [12] KOŘENÝ, R.: *Možnosti zvýšení kvality vysokopevnostních a žárovevých slévarenských slitin hliníku*. VŠB, Ostrava 1991



- [13] *List of phases for BINARY systems* [online]. 12.12.2006 [cit. 2011-02-08]. FactSage.
Dostupné z WWW:
<http://www.factsage.cn/fact/documentation/SGTE/SGTE_list.htm>.
- [14] MALCHARCZIKOVA, J.; JEDLIČKA, Z.; KURZA, M.: *Stanovení fyzikálních a mechanických vlastností intermetalických sloučenin na bázi Ni-Al připravených směrovou krystalizací bridgmanovou metodou na různých zařízeních*. Metal 2007, Hradec nad Moravicí 2007.
- [15] BALE, Christopher. *Phase Diagram* [online]. 29.3.2011 [cit. 2011-04-03]. FACT.
Dostupné z WWW: <<http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDNucl/Al-Ni.jpg>>.
- [16] BALE, Christopher. *Phase Diagram* [online]. 29.3.2011 [cit. 2011-04-03]. FACT.
Dostupné z WWW: <<http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDNucl/Al-Zr.jpg>>.
- [17] BALE, Christopher. *Phase Diagram* [online]. 29.3.2011 [cit. 2011-04-03]. FACT.
Dostupné z WWW: <<http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/TDNucl/Al-Fe.jpg>>.
- [18] ČÍŽEK, L.: *Praktikum ze zkoušení kovů I, Základní zkušební metody*. VŠB, Ostrava 1990.
- [19] MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků* [online]. [2000] , 20.11.2006 [cit. 2011-01-03]. Dostupný z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>.
- [20] *Ústav materiálových věd a inženýrství : Studijní opory BUM, 3SV* [online]. [2009] [cit. 2011-01-20]. Dostupný z WWW:
<<http://ime.fme.vutbr.cz/studijni%20opory.html>>.
- [21] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu II*. CERM, s.r.o., c2002. 392 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [22] Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/Files/Vyuka/BUM/02-BUM.ppt>>
- [23] SILBERNAGEL, A.: *Nauka o materiálu I*, skripta FS VŠB –TU Ostrava, 2000, 150 s.



- [24] University of Cambridge. *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)*. Animace pro podporu výuky Nauky o materiálu (Materials Science), 2010.
- [25] BŘUSKA, M.: *Termomechanické vlastnosti vybraných hliníkových slitin*, VŠB, Ostrava 2010
- [26] *Optical Microscopy* [online]. 2011 [cit. 2011-04-11]. Materials Engineering. Dostupné z WWW: <https://engineering.purdue.edu/MSE/Research/Facilities/Microstructural/Optical_Microscopy.html>.
- [27] *Department of Textile Materials* [online]. 2005 [cit. 2011-03-8]. Rastrovací elektronový mikroskop. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/?q=en/rem>>.
- [28] *Laboratoř elektronové mikroskopie* [online]. 2002 [cit. 2011-03-8]. ÚPT-AV-ČR. Dostupné z WWW: <<http://www.isibrno.cz/lem/>>.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Binární diagram Al-Cu	21
Obrázek 2: Závislosti meze pevnosti (R_m) na obsahu mědi	22
Obrázek 3: Závislosti smluvní meze kluzu (R_p) na obsahu mědi	22
Obrázek 4: Závislosti tažnosti (A) na obsahu mědi	23
Obrázek 5: Binární diagram Al-Ni	24
Obrázek 6: Binární diagram Al-Co	25
Obrázek 7: Binární diagram Al-Sb	26
Obrázek 8: Binární diagram Al-Zr	27
Obrázek 9: Binární diagram Al-Ti	28
Obrázek 10: Binární diagram Al-Mn	29
Obrázek 11: Binární diagram Al-Fe	30
Obrázek 12: Odečtení základních mechanických vlastností materiálů:	35
Obrázek 13: Skluzové systémy	36
Obrázek 14: Průběh vtlačování indentoru	38
Obrázek 15: Dvoudílná kokila	40
Obrázek 16: Tavicí agregát	40
Obrázek 17: Odlitek zkušebního tělesa	40
Obrázek 18: Horizontální vodou chlazená bruska	42
Obrázek 19: Olympus GX51	42
Obrázek 20: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 100x	43
Obrázek 21: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 500x	43
Obrázek 22: Mikrostruktura vz. č. 14 - zvětšeno 1000x	44
Obrázek 23: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 100x	45
Obrázek 24: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 500x	45
Obrázek 25: Mikrostruktura vz. č. 28 - zvětšeno 1000x	46
Obrázek 26: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 100x	47
Obrázek 27: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 500x	47
Obrázek 28: Mikrostruktura vz. č. 31 - zvětšeno 1000x	48
Obrázek 29: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 100x	49
Obrázek 30: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 500x	49
Obrázek 31: Mikrostruktura vz. č. 40 - zvětšeno 1000x	50
Obrázek 32: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 100x	51

Obrázek 33: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 500x.....	51
Obrázek 34: Mikrostruktura vz. č. 42 - zvětšeno 1000x.....	52
Obrázek 35: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 100x.....	53
Obrázek 36: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 500x.....	53
Obrázek 37: Mikrostruktura vz. č. 52 - zvětšeno 1000x.....	54
Obrázek 38: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 100x.....	55
Obrázek 39: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 500x.....	55
Obrázek 40: Mikrostruktura vz. č. 82 - zvětšeno 1000x.....	56
Obrázek 41: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 100x.....	57
Obrázek 42: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 500x.....	57
Obrázek 43: Mikrostruktura vz. č. 84 - zvětšeno 1000x.....	58
Obrázek 44: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 100x.....	59
Obrázek 45: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 500x.....	59
Obrázek 46: Mikrostruktura vz. č. 90 - zvětšeno 1000x.....	60
Obrázek 47: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 100x.....	61
Obrázek 48: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 500x.....	61
Obrázek 49: Mikrostruktura vz. č. 101 - zvětšeno 1000x.....	62
Obrázek 50: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 100x.....	63
Obrázek 51: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 500x.....	63
Obrázek 52: Mikrostruktura vz. č. 104 - zvětšeno 1000x.....	64
Obrázek 53: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 100x.....	65
Obrázek 54: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 500x.....	65
Obrázek 55: Mikrostruktura vz. č. 112 - zvětšeno 1000x.....	66
Obrázek 56: Histogram četností	67
Obrázek 57: Snímek vzorku 31 - zvětšení 2000x	68
Obrázek 58: Snímky vzorku 31 - zvětšení a) 500x b) 3500x	69
Obrázek 59: Snímek vzorku 42 - zvětšení 2000x	70
Obrázek 60: Snímky vzorku 42 - zvětšení a) 500x b) 2000x	71
Obrázek 61: Snímek vzorku 82 - zvětšení 2000x	72
Obrázek 62: Snímky vzorku 82 - zvětšení a) 500x b) 2000x	73
Obrázek 63: Snímek vzorku 101 - zvětšení 2000x	74
Obrázek 64: Snímky vzorku 101 - zvětšení a) 500x b) 2000x	75
Obrázek 66: Vzorek pro tahovou zkoušku	76



Obrázek 65: trhacím stroji značky INOVA	76
Obrázek 67: Vzorek s vložkami pro tahovou zkoušku	76
Obrázek 68: Tvrdoměr WPM	86
Obrázek 69: Rozložení vpichů.....	86
Obrázek 70: Graf naměřených hodnot tvrdosti dle Brinella.....	87

Seznam tabulek

Tabulka 1: Celosvětová spotřeba hliníku v odvětvích průmyslu v roce 2002.....	12
Tabulka 2: Nejběžnější intermetalické fáze ve slitinách Al	19
Tabulka 3: Vlastnosti slitiny RR350.....	20
Tabulka 4: Destruktivní zkoušky mechanických vlastností	34
Tabulka 5: Mechanické vlastnosti u zkoušky tahem	37
Tabulka 6 Chemické složení slitiny RR.350 (hm.%)	39
Tabulka 7 Odlité vzorky	41
Tabulka 8: Chemické složení leptadla na hliníkové slitiny	42
Tabulka 9: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 31	68
Tabulka 10: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 31	68
Tabulka 11: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 42.....	70
Tabulka 12: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 42.....	70
Tabulka 13: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 82.....	72
Tabulka 14: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 82.....	72
Tabulka 15: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 101	74
Tabulka 16: Chemické složení analyzovaných míst vzorku č. 101	74
Tabulka 17: Výsledky tahové zkoušky I. tavby.....	77
Tabulka 18: Výsledky tahové zkoušky II. tavby	79
Tabulka 19: Výsledky tahové zkoušky III. tavby	81
Tabulka 20: Výsledky tahové zkoušky IV. tavby.....	83
Tabulka 21: Naměřené hodnoty tvrdosti dle Brinella.....	87

Seznam Grafů

Graf 1: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350.....	77
Graf 2: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350.....	77

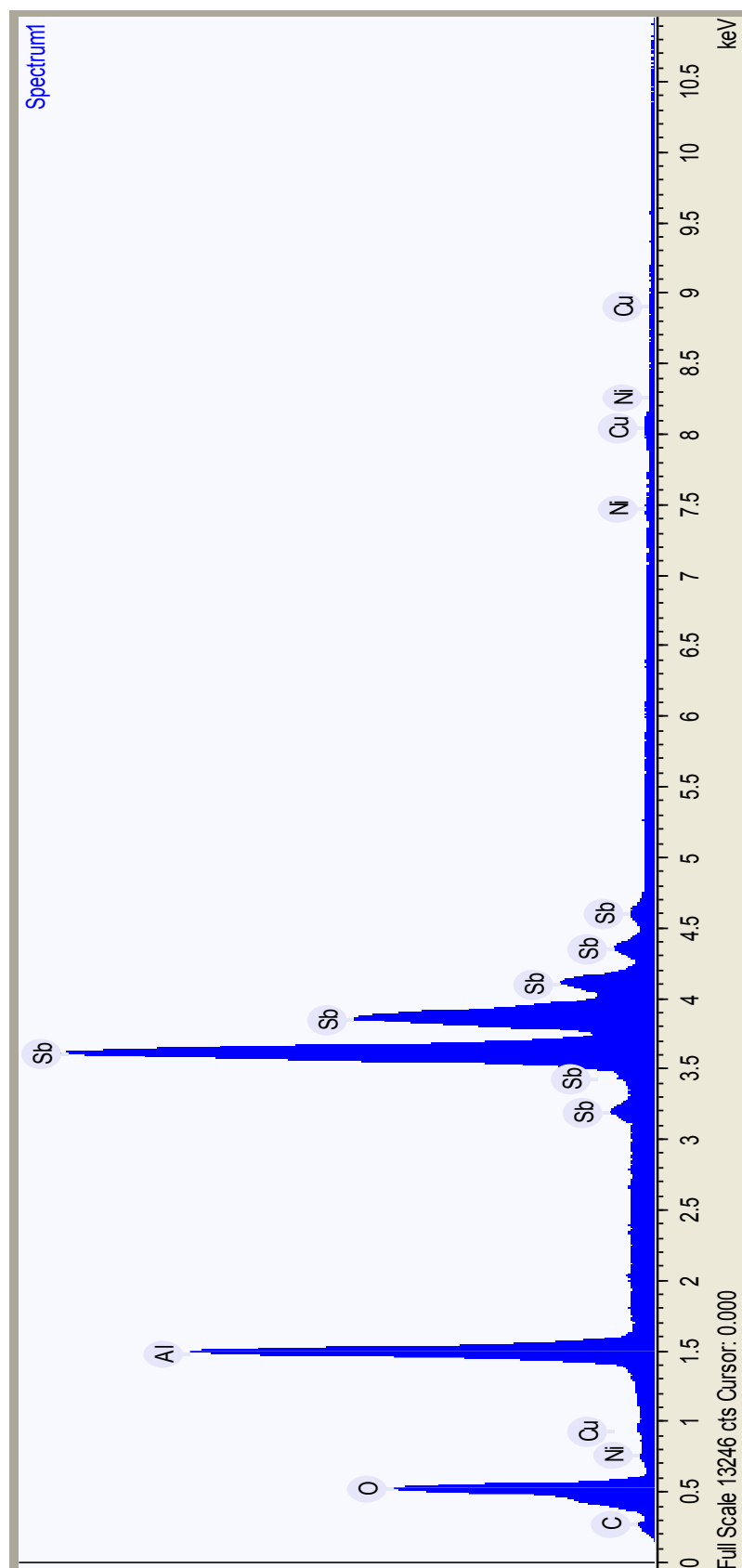


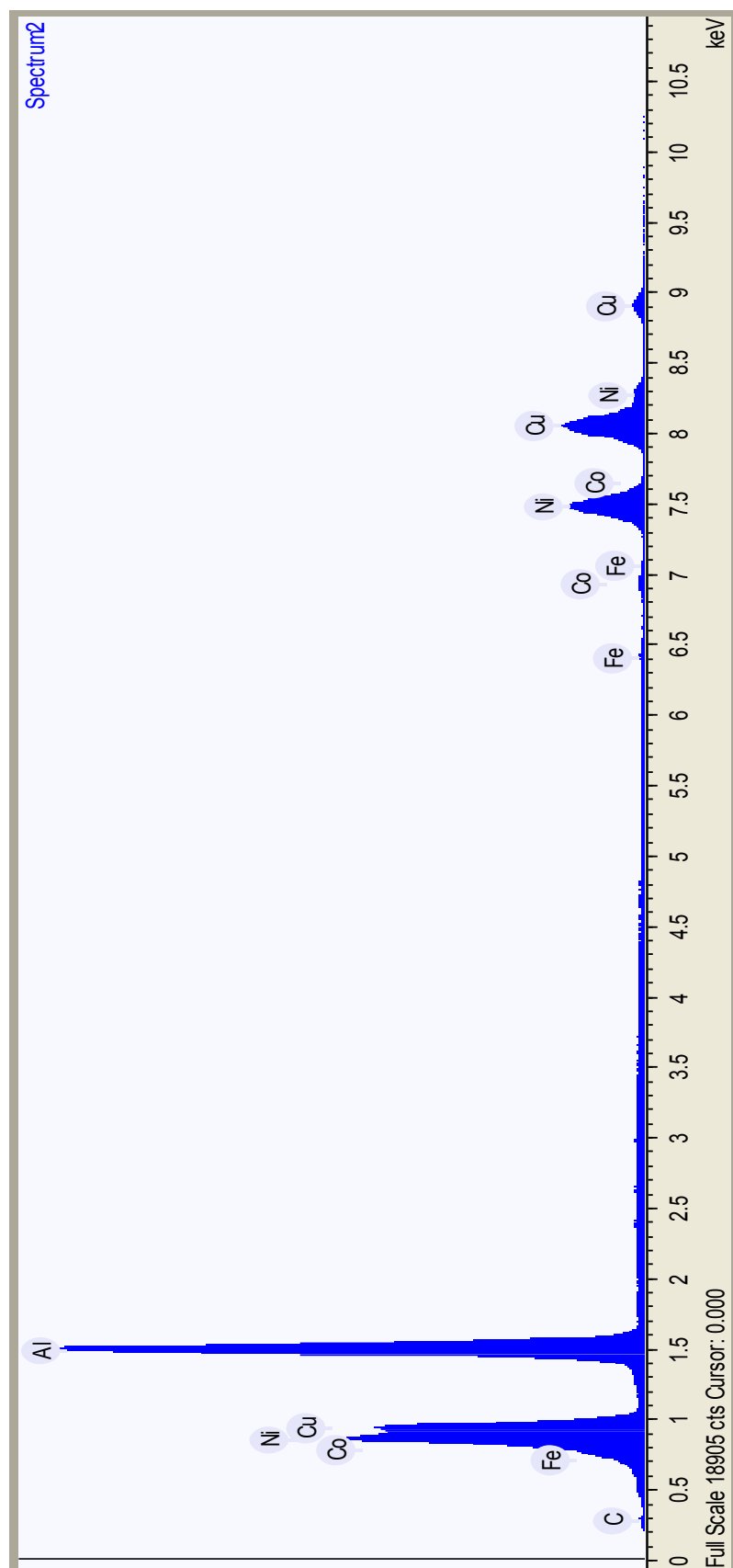
Graf 3: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350.....	78
Graf 4: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350.....	79
Graf 5: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350.....	79
Graf 6: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350.....	80
Graf 7: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350.....	81
Graf 8: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350.....	81
Graf 9: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350.....	82
Graf 10: Závislost pevnosti na teplotě slitiny RR350.....	83
Graf 11: Závislost plasticity na teplotě slitiny RR350.....	83
Graf 12: Závislost lomové práce na teplotě slitiny RR350.....	84
Graf 13: Srovnání pevnosti všech čtyř taveb	85

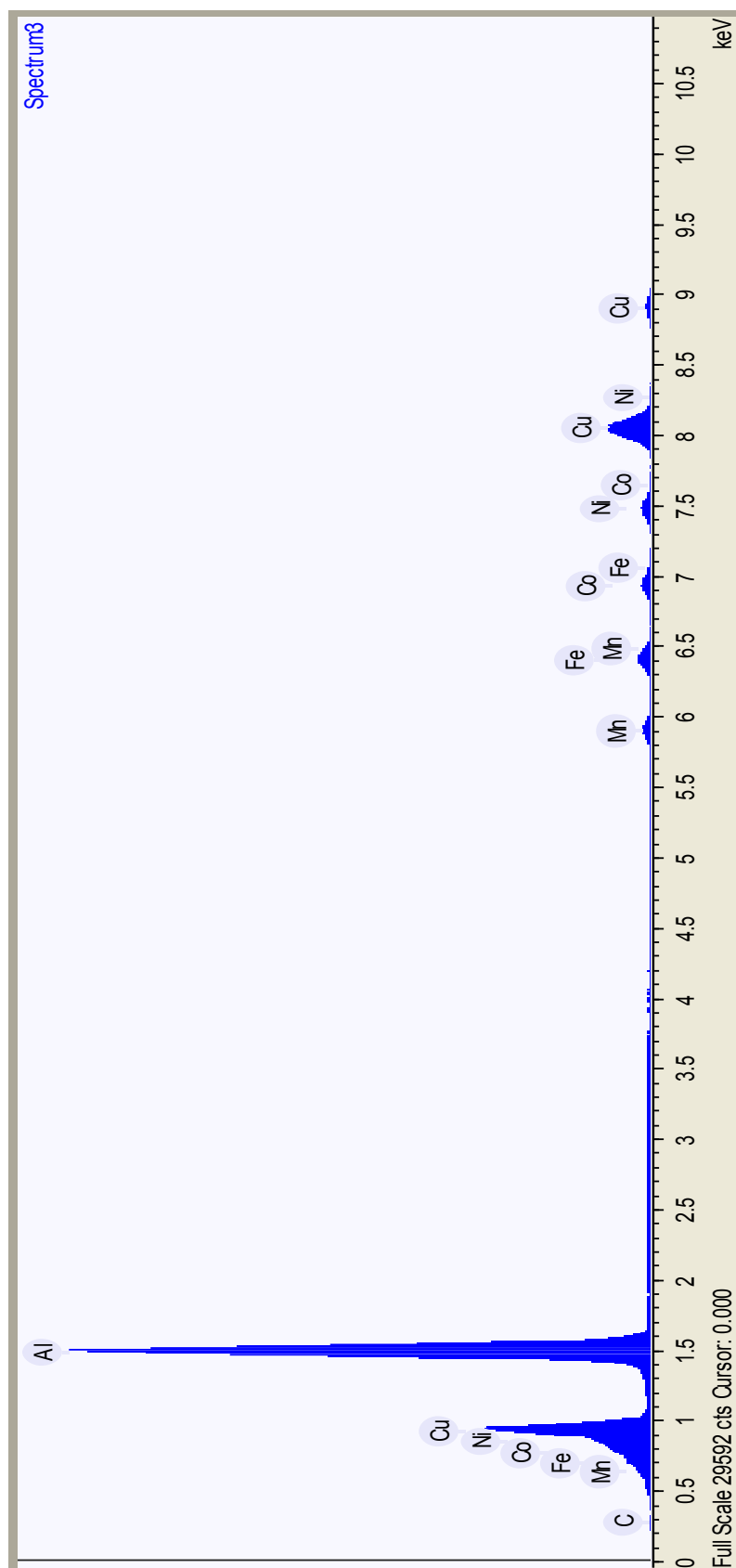
Seznam příloh:

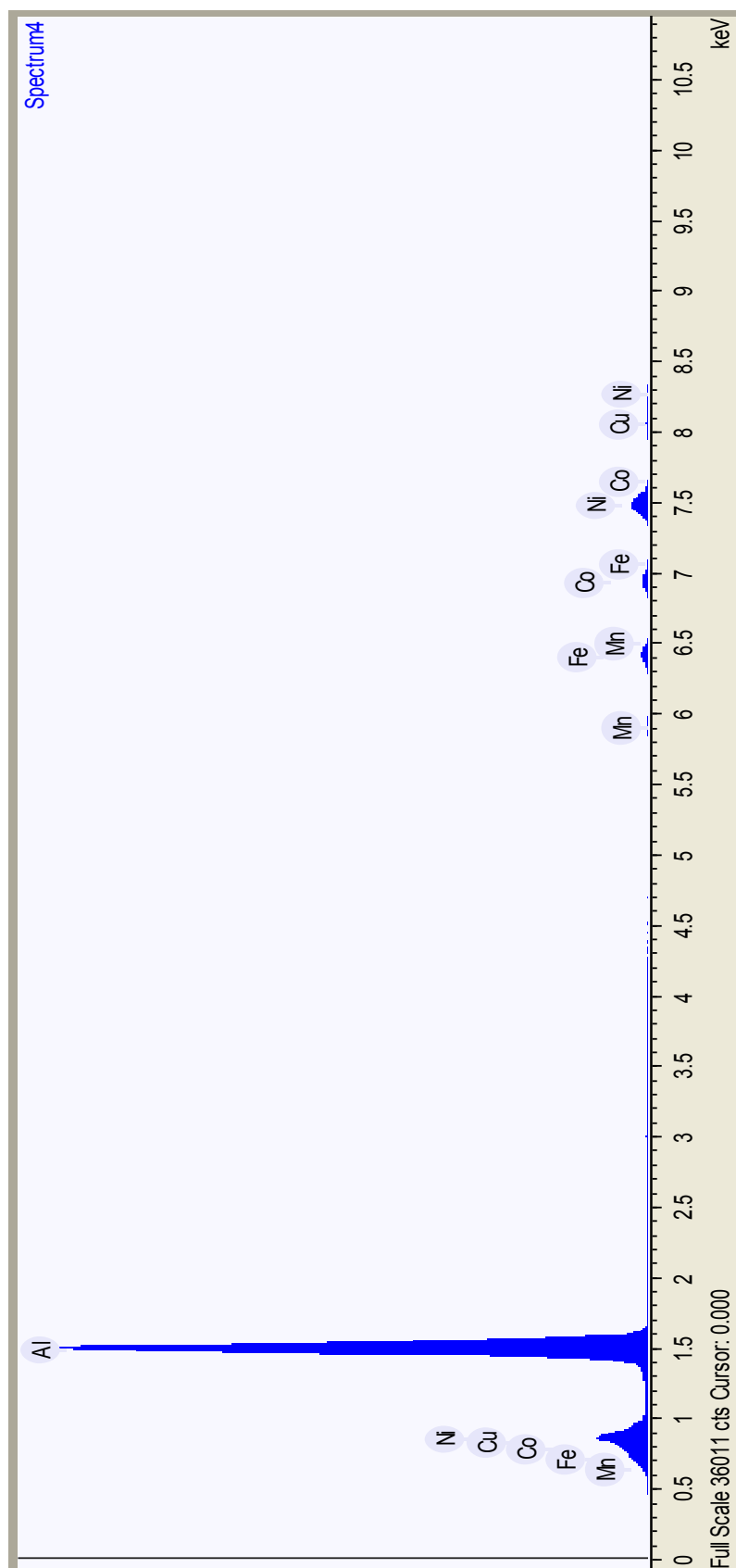
Spektra fází 1, 2, 3, 4 a matrice z elektronového mikroskopu:











Vzorek č.31 Naměřené hodnoty z elektronového mikroskopu

Weight%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Sb
matrice		97,7					2,3		
matrice		96,6					3,4		
Spectrum1	15,6	24,7				0,8	2,1		56,7
Spectrum1	13,8	20,3				0,6	1,6		63,7
Spectrum1	16,4	29,9				0,6	1,5		51,7
Spectrum2		53,1		0,7	1,1	9,9	35,1		
Spectrum2		47,4		0,2	0,6	15,2	36,6		
Spectrum2		49,1		0,3	0,7	10,0	39,9		
Spectrum2		50,4		1,1	1,6	8,9	37,9		
Spectrum2		48,9		0,7	0,9	10,9	38,5		
Spectrum3		66,8	1,5	2,8	2,6	4,6	21,6	0,2	
Spectrum3		60,0	1,4	2,8	2,7	5,3	26,0	1,8	
Spectrum3		61,7	2,3	3,1	2,8	4,7	25,5		
Spectrum4		79,3	0,5	2,3	2,9	11,0	3,9		
Spectrum4		76,5	0,7	2,8	3,8	13,0	3,3		
Spectrum4		73,8	0,7	3,0	4,0	14,5	4,0		

atomic%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zr	Sb
matrice		99,0					1,0		
matrice		98,5					1,5		
Spectrum1	40,6	38,1				0,5	1,4		19,4
Spectrum1	39,8	34,5				0,5	1,1		24,1
Spectrum1	39,6	42,8				0,4	0,9		16,4
Spectrum2		72,3		0,5	0,7	6,2	20,3		
Spectrum2		67,4		0,1	0,4	10,0	22,1		
Spectrum2		69,1		0,2	0,4	6,5	23,8		
Spectrum2		70,1		0,8	1,0	5,7	22,4		
Spectrum2		68,9		0,4	0,6	7,1	23,0		
Spectrum3		82,1	0,9	1,6	1,5	2,6	11,2	0,1	
Spectrum3		77,6	0,9	1,7	1,6	3,1	14,3	0,7	
Spectrum3		78,5	1,4	1,9	1,6	2,8	13,8		
Spectrum4		89,3	0,3	1,3	1,5	5,7	1,9		
Spectrum4		87,6	0,4	1,5	2,0	6,8	1,6		
Spectrum4		86,0	0,4	1,7	2,1	7,7	2,0		

Vzorek č.42 Naměřené hodnoty z elektronového mikroskopu

weight%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		97,6					2,4	
Spectrum1	18,4	24,6				2,4	4,2	50,4
Spectrum1	18,2	23,0				0,3	0,7	57,8
Spectrum1	17,9	17,1				0,3	0,7	64,1
Spectrum2		47,0		0,3	0,5	16,7	35,5	
Spectrum2		45,0		0,2	0,5	13,8	40,5	
Spectrum3		59,5	3,0	3,0	2,4	4,3	27,6	
Spectrum3		53,8	2,9	3,8	3,0	4,9	31,7	
Spectrum3a		58,3				1,2	40,5	
Spectrum3a		49,3				1,2	49,5	
Spectrum4		70,5	0,7	3,1	4,5	15,7	5,4	
Spectrum4		71,2	0,6	3,1	4,1	14,2	6,7	

atomic%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
matrice		99,0					1,0	
Spectrum1	44,6	35,3				1,6	2,6	16,0
Spectrum1	45,8	34,4				0,2	0,5	19,2
Spectrum1	48,7	27,6				0,2	0,5	23,0
Spectrum2		67,0		0,2	0,3	10,9	21,5	
Spectrum2		65,3		0,2	0,4	9,2	25,0	
Spectrum3		77,0	1,9	1,9	1,4	2,6	15,2	
Spectrum3		72,6	1,9	2,4	1,8	3,1	18,1	
Spectrum3a		76,6				0,7	22,6	
Spectrum3a		69,6				0,8	29,6	
Spectrum4		83,9	0,4	1,8	2,5	8,6	2,8	
Spectrum4		84,5	0,4	1,8	2,2	7,8	3,4	

Vzorek č. 82 Naměřené hodnoty z elektronového mikroskopu

weight%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
Spectrum1	14,2	19,6				0,6	1,4	64,2
Spectrum1	15,1	28,1				0,4	1,0	55,4
Spectrum2		51,1		0,4	0,7	17,3	30,5	
Spectrum2		45,6		0,8	1,2	21,2	31,2	
Spectrum2		44,9		0,4	0,7	12,5	41,5	
Spectrum3		53,7	2,2	4,3	3,6	5,5	30,8	
Spectrum3		54,9	1,7	4,5	3,7	4,2	31,0	
Spectrum4		68,4	0,7	3,5	4,2	17,2	5,9	
Spectrum4		74,8	0,7	3,0	4,2	13,9	3,4	
Spectrum4		72,3	0,8	4,7	5,6	12,7	3,9	
matrice		96,2					3,8	

atomic%

Name	O	Al	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
Spectrum1	40,8	33,5				0,5	1,0	24,2
Spectrum1	38,3	42,3				0,3	0,7	18,5
Spectrum2		70,5		0,3	0,4	10,9	17,9	
Spectrum2		65,6		0,5	0,8	14,0	19,0	
Spectrum2		65,3		0,3	0,5	8,3	25,6	
Spectrum3		72,5	1,4	2,8	2,2	3,4	17,7	
Spectrum3		73,5	1,1	2,9	2,3	2,6	17,6	
Spectrum4		82,6	0,4	2,0	2,3	9,6	3,0	
Spectrum4		86,6	0,4	1,7	2,2	7,4	1,7	
Spectrum4		85,1	0,5	2,6	3,0	6,9	1,9	
matrice		98,3					1,7	

Vzorek č. 101 Naměřené hodnoty z elektronového mikroskopu

weight%

Name	O	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
Spectrum1	17,4	30,0						0,9	51,6
Spectrum1	16,3	15,6					0,4	1,1	66,6
Spectrum2		44,5			0,4	0,9	21,9	32,2	
Spectrum2		42,9			0,4	0,5	23,0	33,2	
Spectrum3		59,7		2,6	3,9	2,4	4,4	27,0	
Spectrum3		57,3		2,1	3,8	3,5	4,8	28,5	
Spectrum4		70,1		0,7	4,5	5,5	15,2	4,0	
Spectrum4		72,1		0,8	4,1	5,0	14,4	3,6	
matrice		96,9	0,7					2,3	
matrice		96,9	0,5					2,6	

atomic%

Name	O	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Sb
Spectrum1	41,3	42,1						0,6	16,1
Spectrum1	47,0	26,7					0,3	0,8	25,3
Spectrum2		64,6			0,3	0,6	14,6	19,8	
Spectrum2		63,1			0,3	0,4	15,6	20,8	
Spectrum3		77,1		1,6	2,4	1,4	2,6	14,8	
Spectrum3		75,3		1,3	2,4	2,1	2,9	15,9	
Spectrum4		83,6		0,4	2,6	3,0	8,3	2,0	
Spectrum4		84,9		0,4	2,3	2,7	7,8	1,8	
matrice		98,6	0,4					1,0	
matrice		98,6	0,3					1,1	